

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Diseño de un generador de vórtices

MEMORIA

Autor: Marcos de Pouplana Queralt
Director: Enric Trillas Gay
Convocatòria: Gener 2017



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

El objetivo de este trabajo consiste en estudiar la influencia que tiene en las características aerodinámicas la implementación de generadores de vórtices, que son unas pequeñas piezas aerodinámicas, en un turismo en función de su geometría. Para conseguir dicho objetivo, es necesario diseñar un modelo dinámico que permita determinar, a partir de parámetros conocidos las fuerzas que actúan sobre el vehículo. Se parte de una geometría inicial conseguida de una librería. Posteriormente, se le realizan modificaciones con el programa SolidWorks®, con tal de adaptarla al programa que se encargará del análisis de la misma. La geometría inicial se convertirá en una más simple y compacta. Es necesario tratarla, ya que sino, no sería posible procesarla con el programa de elementos finitos disponible. En este caso, se utilizará el Ansys Fluent®.

En este programa se someterá la geometría a distintas operaciones. La primera operación es crear la geometría final, que consiste en crear un volumen de control al cual se le restará el volumen del coche. Una vez obtenido el volumen, es requerido mallar el volumen para que el programa pueda operar. Para determinar las características correctas de mallado, se realiza un estudio de la malla para la geometría en cuestión. En este estudio se busca la influencia del tamaño de la malla en el resultado. Teniendo el volumen correctamente mallado y las condiciones de contorno definidas, se procede a simularlo y posteriormente, a obtener los datos de fuerzas que el programa Ansys Fluent® refleja.

Los resultados revelan que la altura de los generadores de vórtices y su orientación respecto al flujo no son valores arbitrarios, sino que de ellos depende la fuerza resultante que el fluido provoca sobre el turismo, por lo que el diseño de los generadores de vórtices no será aleatorio y existirán unas dimensiones óptimas.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. GLOSARIO	7
2. PREFACIO	8
2.1. Origen del proyecto	8
2.2. Motivación	8
3. FUNDAMENTO TEÓRICO	9
3.1. Capa límite	9
3.1.1. Separación capa límite	10
3.2. Número de Reynolds	11
3.3. Laminar vs Turbulento	11
3.4. Ecuación de Bernoulli	12
3.5. Arrastre (Drag)	13
3.6. Sustentación (Lift)	14
4. INTRODUCCIÓN	15
4.1. Antecedentes	15
4.2. Objetivos generales	17
4.3. Objetivos específicos.	18
4.4. Alcance del proyecto	19
5. METODOLOGÍA	20
5.1. Alternativas.....	20
5.2. Procedimiento	21
6. GENERADOR DE VÓRTICES (VG)	23
6.1. Tipos de VG	26
6.1.1. Airtab	27
6.1.2. Aleta.....	27
6.1.3. Rectangular	28
6.1.4. Delta	28
7. GEOMETRÍA DEL TURISMO SIN VG	29
7.1. Introducción a la geometría.....	29
7.2. Tratamiento de la geometría.....	30

7.3. Programa de elementos finitos.....	31
7.3.1. Descripción del proceso	31
7.3.2. Design Modeler de Ansys®	32
7.3.3. Mallado	33
7.3.4. Ansys Fluent®	37
8. DISEÑO VG	40
8.1. Parámetros	41
8.1.1. Altura	41
8.1.2. Orientación	42
9. RESULTADOS	44
9.1. Comparación CD y CL.....	44
9.1.1. Parámetro: Altura.....	44
9.1.2. Parámetro: Orientación.....	45
9.1.2.1. Ángulos opuestos	45
9.1.2.2. Ángulo decreciente	45
9.1.2.3. Mismo ángulo.....	46
9.2. Simulación	46
9.2.1. Sin VG	46
9.2.2. Con VG.....	49
10. ESTUDIO ECONÓMICO	53
10.1. Costes del desarrollo del proyecto	53
10.2. Diagrama de Gantt	56
11. EVALUACIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	57
11.1. Análisis.....	57
11.2. Estado previo del proyecto	57
11.3. Estado final tras la acción humana	59
11.4. Impacto medioambiental	59
CONCLUSIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
Referencias bibliográficas	62
Bibliografía complementaria	62
ANNEXO	64
A. Medidas y vistas	64

A.1. Medidas y vistas modelo inicial.....	64
A.2. Medidas y vistas modelo simplificado.....	65
B. Mallado alternativo	66

1. Glosario

CD: Drag coefficient, coeficiente de arrastre

CL: Lift coefficient, coeficiente de sustentación

VG: Vortex generator, generador de vórtices

ANSYS: Analysis System

CFD: Computational Fluid Dynamics

Malla, mallado: El proceso de subdividir el modelo en pequeñas partes.

2. Prefacio

2.1. Origen del proyecto

La idea de realizar este proyecto nació aparentemente de casualidad, ya que no fue un tema que se tuviera en mente desde hacía tiempo ni nada. No obstante, después de haber realizado casi todas las asignaturas de la carrera, me llamó la atención el mundo de la mecánica de fluidos, también es interesante comentar que siempre me había gustado el mundo de la automoción, por lo que cuando se me presentó la oportunidad de realizar este tema como trabajo final de grado, no me lo pensé dos veces.

El inicio del proyecto no fue fácil, no sabía muy bien cómo enfocararlo ni cómo hacer que tuviera cierta relevancia. Una vez superada esta problemática, no se volvió más sencillo, sino lo contrario, el mayor problema fue poder realizar correctamente el mallado para el programa de simulación.

Finalmente, todos los inconvenientes que fueron apareciendo pudieron ser resueltos y fue posible alcanzar el resultado actual.

2.2. Motivación

Como se ha comentado anteriormente realizar este proyecto no ha sido especialmente un camino fácil de recorrer. A pesar de ello, el hecho de que fuera una temática de interés ha permitido que se le dedicara más atención de la se hubiera imaginado y que se tuviera ganas de afrontar los problemas presentes.

Si se hubiera realizado este proyecto simplemente porque se debía hacer, no hubiera sido posible realizarlo, el interés personal por el mundo de la automoción ha permitido llevarlo a cabo, además de producir una satisfacción personal.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1. Capa límite

La capa límite es una forma de facilitar los cálculos para poder solucionar las complicadas ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones se conocen como ecuaciones de Navier-Stokes.¹

La capa límite se estudia para analizar la variación de velocidades en la zona de contacto entre un fluido y un obstáculo que se encuentra en su seno o por el que se desplaza. La presencia de esta capa es debida principalmente a la existencia de la viscosidad, propiedad inherente de cualquier fluido. Ésta es la causante de que el obstáculo produzca una variación en el movimiento de las líneas de corriente más próximas a él. La variación de velocidades, como indica el principio de Bernoulli², conlleva una variación de presiones en el fluido, que pueden dar lugar a efectos como las fuerzas de sustentación y de resistencia aerodinámica.

La teoría de capa límite fue introducida por Prandtl³, esta teoría establece que, para un fluido en movimiento, todas las pérdidas por fricción tienen lugar en una delgada capa adyacente al contorno del sólido (llamada capa límite) y que el flujo exterior a dicha capa puede considerarse como carente de viscosidad. La capa límite es una capa de fluido cercana a la pared, donde los efectos viscosos no pueden ser despreciados. Estos efectos viscosos son la resistencia que tiene un fluido a ser deformado continuamente en el tiempo al recibir una fuerza tangencial. Se definen como el cociente entre el esfuerzo tangencial aplicado sobre un fluido y la velocidad a la que éste se deforma.

Los esfuerzos cortantes deben ser apreciables únicamente en las regiones donde existan

¹ Navier. Claude-Louis Marie Henri Navier (Dijon, 10 de febrero de 1785-París, 21 de agosto de 1836) fue un ingeniero y físico francés.

Stokes. Sir George Gabriel Stokes (13 de agosto de 1819-1 de febrero de 1903) fue un matemático y físico irlandés que realizó contribuciones importantes a la dinámica de fluidos.

² Bernoulli. Daniel Bernoulli (Groninga, 8 de febrero de 1700 - Basilea, 17 de marzo de 1782) fue un matemático, estadístico, físico y médico neerlandés-suizo.

³ Prandtl. Ludwig Prandtl (Freising, 4 de febrero de 1875 – Göttinga, 15 de agosto de 1953) fue un ingeniero y físico alemán.

grandes gradientes de velocidad; el flujo en otras regiones se podría describir con gran exactitud por medio de las ecuaciones para flujo no viscoso.

Toda partícula de un fluido en contacto con un sólido tiene siempre la velocidad del sólido, no existe deslizamiento entre fluidos y sólidos en contacto. Esta propiedad es conocida como condición de no deslizamiento.

Estos conceptos se han de tener muy en cuenta a la hora de estudiar la aerodinámica. Las partículas de aire que envuelven un turismo, cuando éste está en movimiento, están sometidas a esta condición de no deslizamiento, por lo que la velocidad relativa entre el coche y las partículas de aire en contacto con éste es 0. A su vez, las partículas de aire en contacto con las anteriores también están alteradas, no teniendo la misma velocidad que tendría esta misma partícula si estuviera a una distancia infinita, y lo mismo sucede con las partículas en contacto con éstas. Esta zona donde el fluido se ve alterado por la condición de no deslizamiento con un sólido se conoce como capa límite, que se compone por el fluido en contacto con el sólido hasta que alcanza un 99% de la velocidad que debería tener si estuviera lo suficientemente alejada del sólido.

Las partículas de aire que se desplazan por la capa límite lo hacen primero de manera laminar, de forma paralela entre ellas, mientras que más adelante su trayectoria se va volviendo más caótica, siendo así un flujo turbulento, conllevando además un aumento del espesor de la capa límite.

3.1.1. Separación capa límite

Un fluido tiende a fluir siguiendo el camino más o menos igual que le marca la superficie del sólido por el que fluye, esta condición se cumple fácilmente cuando el fluido es forzado a fluir a grandes velocidades por una superficie curva hacia arriba, pero cuando se trata de una superficie curva hacia abajo, presenta ciertas dificultades para mantenerse unido al cuerpo; en el caso de velocidades suficientemente altas, el flujo se separa de la superficie del cuerpo. Este fenómeno se llama la separación del flujo. Cuando un fluido se separa de un cuerpo, forma una región, que es de baja presión, separada entre el cuerpo y la corriente fluida. Al separarse el flujo, aumenta la fuerza de arrastre de presión que es mayor cuanto mayor sea la región separada. En la zona posterior a la separación hay una zona de calma, con fluido muy decelerado, en la cual se forman grandes torbellinos, llamados vórtices. Esta zona recibe el nombre de estela. Estos torbellinos consumen gran cantidad de energía y dan lugar a grandes pérdidas de presión en el fluido. El acontecimiento de separación no se limita a cuerpos romos, se da también en cuerpos aerodinamizados.

3.2. Número de Reynolds

El número de Reynolds⁴ se puede definir como la relación entre las fuerzas convectivas y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Éste relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y una dimensión característica de la geometría en una expresión adimensional y viene definida por la ecuación (3.1).

$$Re = \rho u L / \mu \quad (3.1)$$

ρ : densidad del fluido [kg/m^3]

L : longitud característica del cuerpo [m]

u : velocidad del fluido [m/s]

μ : viscosidad dinámica del fluido [$\text{kg/m}\cdot\text{s}$]

Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño (>2000)) o turbulento (número de Reynolds grande ($<5 \times 10^5$)).

3.3. Laminar vs Turbulento

La condición de corriente libre del fluido incluye propiedades constantes para la densidad, viscosidad, temperatura y presión en cualquier dirección. Una vez que el fluido entra en contacto con la superficie, la velocidad del fluido cambiará y la distribución de velocidad cambiará ya que el fluido progresa a lo largo de la pared. También se puede asegurar que la capa límite sufrirá cambios a lo largo de la pared. Al principio, las líneas de distribución de velocidad son casi idénticas al fluido en contacto con la superficie, por lo que se clasificaría como flujo laminar, pero se desarrollará finalmente en un flujo que se puede clasificar como flujo turbulento. El flujo laminar se caracteriza por ser liso y estable, y es la sección inicial de la capa límite a lo largo de una capa plana. Si el flujo se da en una superficie plana suficientemente larga, la capa límite se desarrollará turbulenta, que sea turbulenta implica que las líneas de distribución del flujo se entremezclen entre sí, formando un movimiento arbitrario y caótico. El flujo turbulento provoca que la capa límite sea mayor. La región entre laminar y turbulento se conoce como la región de transición. Es la región

⁴ Reynolds. Osborne Reynolds (Belfast, Irlanda del Norte, 23 de agosto de 1842 - Watchet, Inglaterra, 21 de febrero de 1912), fue un ingeniero y físico irlandés que realizó importantes contribuciones en los campos de la hidrodinámica y la dinámica de fluidos.

entre el punto crítico y el punto de transición; el punto crítico es donde la capa límite se hace inestable y el punto de transición es donde el flujo se hace totalmente turbulento.

La ecuación (3.2) para el grosor de la capa límite de un flujo laminar:

$$\delta \approx 5x / Re_x^{1/2} \text{ [m]} \quad (3.2)$$

La ecuación (3.3.) para el grosor de la capa límite para un flujo turbulento:

$$\delta \approx 0.382L / Re^{1/5} \text{ [m]} \quad (3.3)$$

La ecuación (3.4) para el esfuerzo en la pared en flujo laminar, zona de contacto fluido-sólido:

$$c_f = 0.0664 / Re_x^{1/2} \quad (3.4)$$

La ecuación (3.5) para el esfuerzo en la pared en flujo turbulento, zona de contacto fluido-sólido:

$$c_f = 0.027 / Re_x^{1/7} \quad (3.5)$$

La capa turbulenta es ligeramente más gruesa que la laminar, y como el fluido se mueve en todas direcciones, disipa mayor energía, por lo que la fuerza de fricción derivada de ella es mayor.

Sin embargo, el que una capa límite sea laminar o turbulenta depende de la geometría de cada sólido. El flujo laminar va perdiendo velocidad a lo largo de la capa límite, hasta que finalmente se para o incluso retrocede, provocando que la capa límite se desprenda y el flujo ya no siga la forma de la superficie. Este efecto puede ser especialmente perjudicial dependiendo de la aplicación necesaria, por eso en este caso se introducen los generadores de vórtices para retrasar el desprendimiento.

3.4. Ecuación de Bernoulli

El principio más básico de la aerodinámica es el principio de Bernoulli, el cual nos dice que la velocidad a la que se mueve un fluido es inversamente proporcional a la presión que ejerce, principio que viene expresado en la ecuación (3.6), por lo tanto, la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera permanece constante.

$$P + \frac{1}{2} \rho u^2 = k \quad (3.6)$$

P: Presión [Pa]

u: Velocidad [m/s]

Pero para entender completamente la aerodinámica básica también se debe tener en cuenta:

Efecto Venturi: Como consecuencia de la ecuación de Bernoulli, se produce cuando un fluido circula por un conducto cerrado que tiene un estrechamiento, donde se produce una depresión y un aumento de la velocidad del fluido.

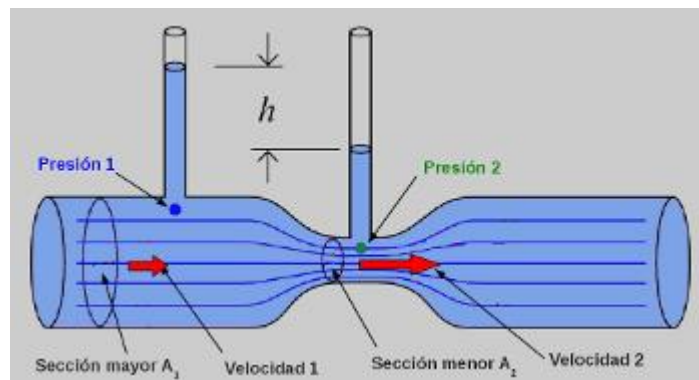


Figura 3.1. Efecto Venturi Referencia: <http://www.sabelotodo.org/fluidos/imagenes/venturi.png>

3.5. Arrastre (Drag)

En cualquier caso, cuando haya un flujo de un fluido en contacto con un objeto, se formará una fuerza consiguiente en el objeto paralela a la velocidad de la corriente libre. Esta fuerza se llama arrastre. La fuerza de arrastre y el coeficiente de arrastre se puede ambos solucionar usando la ecuación (3.7) siguiente.

$$F_D = 0.5 A C_D \rho u \quad (3.7)$$

A: Área del vehículo proyectada en los ejes vertical y horizontal [m²]

C_D=Coeficiente de arrastre [-]

ρ: densidad del fluido [kg/m³]

u : velocidad el fluido [m/s]

La fuerza de arrastre aumentará con el aumento de la densidad, velocidad o área proyectada del objeto.

Un objeto, como un coche, hace el trabajo a fin de adelantarse a través del aire. El aire creará una fuerza de arrastre que se opone al movimiento de objetos. Esto, por su parte, hace que el vehículo tenga que generar más potencia a fin de hacer la misma cantidad de trabajo. El arrastre es una fuerza inevitable que se debe minimizar a fin de maximizar la cantidad de potencia que realmente moverá el vehículo hacia adelante. El arrastre se puede dividir en dos tipos separados que juntos dan el arrastre total. Estos dos tipos se llaman el arrastre de presión y el arrastre de fricción. Arrastre de presión es el resultado de una diferencia de la presión entre lados opuestos de un objeto. El arrastre de fricción es el resultado de la tensión tangencial entre el fluido y el objeto.

3.6. Sustentación (Lift)

El lift es la resultante a la fuerza perpendicular de la velocidad de la corriente libre. El lift es el resultado de las diferencias de presiones en los lados opuestos de un objeto. Siempre que el lift se cree, el arrastre también. Por esta razón, el lift se debe mencionar y no ignorarse, sin embargo no será tan crítico en el análisis de aerodinámica del turismo. En un turismo este coeficiente interesa que sea lo más negativo posible ya que de esta manera la fuerza de sustentación empuja al coche hacia el suelo, evitando que como en el caso de un avión se eleve. La ecuación para la fuerza de lift y el coeficiente de sustentación se muestra en la siguiente ecuación (3.8):

$$F_L = 0.5 A C_L \rho u^2 \text{ [N]} \quad (3.8)$$

A : Área del vehículo proyectada en los ejes horizontal y vertical [m²]

C_L =Coeficiente de sustentación [-]

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

u : velocidad del fluido [m/s]

4. INTRODUCCIÓN

El coche es un elemento que se ha convertido en algo muy normal en nuestro día a día, es más, en una misma familia es probable que haya más de un vehículo. Es por eso que se ha creído interesante realizar un estudio sobre un turismo, ya que es algo que afecta a casi todo el mundo y prácticamente a diario. Y evidentemente si se habla de una máquina, no hay otro factor más relevante que su propio rendimiento, cómo vamos a poder utilizarlo. El rendimiento de cualquier coche es principalmente dependiente de dos factores: la capacidad del motor y la eficacia aerodinámica. Con la potencia siendo constante para un coche dado, o prácticamente, la única manera de mejorar el rendimiento debería ser mejorar sus propiedades aerodinámicas.

El coeficiente de arrastre es una de las propiedades del flujo que impiden alcanzar el estado ideal, por eso es interesante minimizarlo para lograr aumentar la eficacia mecánica. Una de las principales causas del coeficiente de arrastre es la separación de la capa límite al final de un coche. Cuando la capa límite se separa, su grosor de desplazamiento aumenta bruscamente, que modifica el flujo potencial exterior y el campo de presión. Un método simple de reducir los efectos de arrastre es cambiar la geometría del cuerpo del coche a una forma muy aerodinamizada, como en un coche de la Fórmula 1. Esta forma aerodinamizada ofrecería la resistencia mínima para expedir el empuje generado por el coche, y de ahí sería propenso al arrastre mínimo. Pero, los coches aerodinamizados serían muy caros de fabricar y de ahí que no tengan ninguna aplicación comercial. La clave para que el vehículo pueda tener éxito tiene que tener un equilibrio entre la eficiencia y lo ergonómico. Hoy en día casi ningún vehículo para pasajeros tiene la forma ideal, de ahí que haya que encontrar otro método para reducir el efecto de arrastre.

Aquí es donde los generadores de vórtices (VG) entran.

Un generador de vórtices es un pequeño dispositivo aerodinámico que puede ser del mismo material que el coche, que consiste en una pequeña veleta por lo general atado a una superficie, de tal manera que el VG se levanta en esta superficie.

4.1. Antecedentes

La aerodinámica es la parte de la mecánica que se dedica a estudiar los movimientos de gases o movimientos relativos de gases y fluidos. En la mayoría de las aplicaciones, el interés se centra en el estudio entre sólidos y agua, o sólidos y aire, siendo éstos los fluidos de mayor repercusión en la situación actual. No obstante, el estudio no se cierra únicamente en estas posibilidades, sino que es posible mediante cualquier tipo de fluido.

El estudio de la aerodinámica es uno de los campos fundamentales en el sector automovilístico, tanto en el mundo de la competición, como en los turismos, que en este caso serán el objeto de estudio. Las formas de los coches no son arbitrarias. Están pensadas pues, para cumplir una serie de objetivos en función del coche que se quiere diseñar y de las prestaciones que se le pretenda dar, de la funcionalidad esperada. Sin embargo, también existe otro aspecto, pura estética, pero igualmente importante. La visión que tiene el usuario de un automóvil depende de las formas del vehículo, y al final si estas formas son del agrado o no del consumidor, jugarán un papel importante en la decisión final de adquirirlo o no. Esta cuestión, se sale de lo meramente técnico e incide más en una opinión personal, de gusto o admiración por un producto. En el caso a estudiar no se tendrá muy en cuenta este último factor, sino que simplemente se valorará las mejoras que provocan la implementación de estos dispositivos. No obstante, no se diseñará cualquier cosa, no se buscará la mejora técnica por la mejora técnica, sino que se intentará llegar a un equilibrio.

Las ecuaciones que rigen los principios de la aerodinámica son ecuaciones complejas, con soluciones no triviales, no pudiéndose resolver por los métodos corrientes alrededor de cuerpos complejos. Es por eso que su estudio requiere de otros métodos que no se basan simplemente en resolver unas ecuaciones, sino de métodos que permitan resolverlo de una forma aproximada.

Las formas de tratar la aerodinámica son limitadas y con la tecnología actual se dispone de dos métodos principales de abordar el problema del estudio aerodinámico.

- Túnel del viento
- Técnicas CFD (Computational Fluid Dynamics)

El túnel del viento es el método más exacto para la resolución de un problema aerodinámico, ya que se reproducen exactamente las condiciones como son en la realidad. Sin embargo, es el método más caro y tiene un gran impacto medioambiental. Los túneles de viento a tamaño real para automóviles sólo se encuentran en casos muy puntuales, son tan exclusivos que hay escuderías que no tienen uno propio, sino que lo alquilan a otras. En instituciones más pequeñas como universidades o centros técnicos, sólo es posible tener un túnel a escala muy reducido, como mucho. Los resultados pues, suelen ser parecidos, ya que se utilizan las ecuaciones de semejanza para conseguir los modelos, pero no idénticos a uno con mayor escala. Es por eso que este método es el óptimo para organizaciones tecnológicas con menor presupuesto.

A pesar de ser un método más económico, no se ha podido disponer de él para realizar pruebas en este estudio, por lo que todo el estudio se ha realizado con las técnicas CFD.

Las técnicas CFD utilizan las aproximaciones por elementos finitos para hallar la solución a las ecuaciones de la aerodinámica. Dividen la geometría en formas simples, y en el contorno de las mismas se aplican las ecuaciones de la aerodinámica.

Es un método en el que se puede obtener resultados muy cercanos a los del túnel de viento con el uso de un ordenador. En los últimos años, los ordenadores han adquirido mayor velocidad, tanto de procesamiento como de tiempo de ejecución. Esto ha permitido reducir los tiempos de cálculo haciendo más factible todavía la resolución de este tipo de problemas mediante las técnicas CFD.

Los métodos CFD suponen trasladar un problema de la realidad, usando geometrías hechas o importadas por ordenador. Posteriormente, utilizando un programa de técnicas CFD se calcula la solución al problema. De esta manera, el material experimental necesario, se limita a una serie de medidas para definir el objeto de estudio, como dimensiones del objeto de estudio, o datos de velocidades, presiones y temperaturas del fluido. Una vez obtenidas esas medidas, gracias a paquetes de elementos finitos como Ansys® es posible diseñar o importar la geometría e imponiendo unas condiciones de contorno, el problema queda resuelto mediante iteraciones.

4.2. Objetivos generales

La aerodinámica es un elemento principal en los automóviles que engloba a varios aspectos. En primer lugar, la influencia de la aerodinámica tiene efectos directos aplicados al consumo, potencia y otros parámetros relacionados con las características mecánicas del vehículo.

Otro punto de vista de la aerodinámica corresponde más a razones estéticas que a razones meramente mecánicas. El acabado de producto y la forma exterior del mismo influyen de forma importante en la decisión del cliente en obtener un producto u otro. De esta manera, el exterior del coche no se puede diseñar atendiendo solo a parámetros físicos sino también pensando en la estética que pueda tener el vehículo.

Es por eso que el objetivo principal de este estudio no será solo mejorar prestaciones mecánicas del vehículo, a partir de ciertos conocimientos en parámetros de la aerodinámica, sino poder utilizar estos conocimientos para un caso real y medible.

Este trabajo tiene como fin, averiguar a partir de un turismo, como es el VW Golf, el efecto que tienen los generadores de vórtices en los turismos y si realmente su implantación es

justificable. No se estudiará un caso particular, sino el caso genérico de los turismos, por ello se ha partido de un turismo estándar para poder sacar conclusiones a partir de ese modelo. Para lograr esto se deberá encontrar una configuración óptima del uso de generadores de vórtices en los turismos. La configuración que se va a tener en cuenta es aquella que generen vórtices que ayuden a que el desprendimiento de la capa límite sea más tarde que conllevará a un menor coeficiente de arrastre. No obstante no será el único factor observable, el coeficiente de sustentación también se tendrá en cuenta, sobre todo en aquellos casos donde haya un coeficiente de arrastre muy parecido.

Para verificar mejor el uso de los VG se comparará el turismo con y sin el uso de VG; posteriormente se analizarán los resultados y se decidirá si es necesaria su implementación. La reducción del coeficiente de arrastre y la reducción de la separación de la capa límite serán parámetros que ayudarán a determinar los resultados.

4.3. Objetivos específicos.

El principal objetivo a lo largo del trabajo va a ser conseguir una configuración geométrica que sea óptima para desarrollar los vórtices que disminuirán el coeficiente de arrastre del vehículo, pero para eso también hay que centrarse en otros puntos importantes que ayudarán a alcanzar dicha meta.

Obtención de un modelo dinámico de fuerzas, que permita obtener un contexto físico para conseguir que los datos que obtengamos tengan una representación y sea posible de validar.

- Entender las fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento
- Relacionar las fuerzas provenientes de distintos fenómenos físicos

Creación de una geometría que pueda adecuarse al problema de optimizar el coche al programa de elementos finitos.

- Obtener información en internet sobre modelos de CAD
- Simplificar y tratar adecuadamente la geometría

Análisis de la aerodinámica

- Mallar correctamente.
- Utilizar el programa Fluent® para analizar la geometría.

- Analizar correctamente los datos obtenidos y sacar conclusiones de los mismos.

4.4. Alcance del proyecto

En este proyecto se estudiará y mostrará el efecto de implementar generadores de vórtices en la parte posterior del turismo. Se compararán diferentes parámetros de los mismos para estudiar su relevancia e impacto. Para poder realizar el estudio se ha seleccionado un Volkswagen Golf. El motivo de su elección ha sido porque el modelo encontrado se adaptaba a los programas que se iban a utilizar en la simulación y el diseño. Para desarrollar el proyecto se han utilizado distintos programas de diseño y simulación, los cuales han permitido obtener unos valores aproximados, pero suficientemente fiables.

5. METODOLOGÍA

5.1. Alternativas

El problema planteado se podría haber sido resuelto de muchas maneras diferentes, que han sido explicadas a grandes rasgos anteriormente. En este trabajo se han realizado una serie de simplificaciones o se han tomado una serie de decisiones, algunas por necesidad, ya que de otra manera no hubiera sido posible desarrollar el estudio, mientras que otras han sido de decisión propia, que han provocado que el trabajo sea finalmente como es.

Este trabajo podría tener la complejidad que se quisiera, la modelización más fácil es el ejemplo real. En el caso de este trabajo, lo más realista sería someter un coche de dimensiones reales a un túnel de viento y observar qué efectos tiene añadir al turismo VG. Éste es el mejor método de conocer las fuerzas aerodinámicas que se ejercen contra un coche. El problema es el coste, como se ha comentado en la introducción.

Un método más sencillo, pero también efectivo sería repetir el mismo estudio, pero a escala. La manera más sencilla sería un túnel de viento pequeño, a escala. Para utilizar este método y poder sacar conclusiones fiables se utilizaría el teorema de Buckingham⁵, que es el teorema fundamental del análisis dimensional, mediante el cual es posible dada una relación física expresable en una ecuación involucrar diferentes magnitudes físicas o variables.

Dicho coche, se podría conseguir a partir de modelos ya contruidos en tiendas de miniatura. También se podría conseguir a partir de un modelo impreso en 3D. Esta última opción parece ser la más interesante, ya que, a partir de un modelo de CAD como es el modelo que se ha realizado para hacer el trabajo, se puede imprimir y tenerlo en volumen para ser analizado. También se pueden realizar modificaciones con el mismo método. Se podrían añadir más o menos VG y comparar resultados, de esta manera se podría utilizar menos material y flexibilizar el modelo, obteniendo muchas variaciones.

La opción del túnel del viento a escala encuentro que es una opción interesante y además se podrían usar los datos obtenidos en comparación con los posibles obtenidos en simulación. El coste en comparación con el túnel real sería efímero, hecho que denota que es una posibilidad factible, no obstante como se ha comentado, al no disponer de la

⁵ Edgar Buckingham (8 de julio de 1867 en Filadelfia, Estados Unidos — 29 de abril de 1940 en Washington D.C., EE. UU.) fue un físico estadounidense.

instalación necesaria se ha optado por realizar simplemente una simulación.

Dentro de la alternativa de simulación existen todavía diferentes variantes. Las geometrías pueden ser más o menos complejas, el mallado puede ser más o menos fino... Las decisiones referentes a la simulación se han tomado en casi todos los aspectos por obligatoriedad, solo se disponía de una versión de estudiante del programa Ansys®, por lo que existía una limitación al realizar el mallado, además que cuanto más compleja sea la malla, mayor potencia de cálculo es necesaria en el ordenador, esto también ha sido un factor a tener en cuenta ya que tampoco se disponía del mejor ordenador posible. Teniendo en cuenta estos factores se ha procurado realizar un estudio lo más realista posible. Estas decisiones podrían haber sido diferentes si se dispusiera de la versión comercial del programa o un ordenador con una potencia de cálculo superior al que se ha utilizado.

Es por eso, que el método elegido y los procedimientos que se han seguido para realizar este trabajo, han sido los acordes al material disponible.

5.2. Procedimiento

A continuación se presentará la forma que se ha seguido a la hora de llevar a cabo el trabajo, es decir, qué procedimiento se ha seguido para abordar el problema que supone obtener la geometría óptima para obtener los vórtices que provoquen el efecto esperado.

Para poder obtener resultados al problema, hay que partir de una geometría. En este caso, se ha partido de una geometría ya creada y se ha modificado con tal de adecuar la misma al programa Ansys®. Esta adaptación supondrá una serie de simplificaciones y modificaciones de la geometría

Además, se deberá añadir a la geometría del vehículo las superficies que se desean estudiar. En este caso, se utilizarán generadores de vórtices que se insertarán en el coche para tener un cuerpo definido. Estas piezas serán creadas con el programa SolidWorks®. Se procederá a aplicar varios tipos de geometrías con tal de hacer un estudio detallado de la influencia de los VG en el coche. En este caso, se estudiará primeramente la geometría de los VG y una vez determinada cual es la más adecuada se implementarán en el turismo, no obstante, también se deberá estudiar qué efectos aerodinámicos sufre el coche antes de implementar los generadores de vórtices. Una vez implementados, se estudiará su efecto en el turismo en función de su altura y de su orientación. El paso siguiente, consistirá en importar la geometría a un programa de elementos finitos, en este caso Ansys Fluent®. En este programa, se tratarán tres apartados fundamentales. La adecuación final de la geometría para el análisis, el mallado del volumen a estudiar y por último, el análisis de resultados con el programa Fluent®.

Para poder analizar correctamente el problema, lo que se tendrá que hacer será obtener el hueco que deja el coche a un volumen cerrado de aire. Lo que interesa es el estudio del volumen de aire, por lo que la obtención de la geometría sólo es un paso intermedio.

En la parte de mallado, habrá que hacer diversas pruebas de cómo podría afectar la malla a las posibles soluciones, por lo que habría que hacer un estudio de malla utilizando diversos tamaños y/o métodos de la misma.

Después, se introduciría la malla en el programa Fluent® y se procedería a realizar el análisis modificando los parámetros que sean necesarios. Con esto se obtendrían los resultados pertinentes.

Este sería el procedimiento a seguir para realizar el trabajo. Hay que destacar que se trata de un proceso iterativo. Sobre todo en el aspecto del funcionamiento interno de los programas. Hay veces que la geometría puede dar lugar a problemas en según qué programas. Más adelante, se explicará cada uno de los pasos de forma detallada, de forma que se pueda seguir más de cerca el proceso. No obstante, esta sería una manera esquematizada de la resolución del trabajo que se ha ido siguiendo durante el proyecto.

6. GENERADOR DE VÓRTICES (VG)

Como se ha mencionado antes, el arrastre es la fuerza que contraviene en la dirección del empuje de un coche y por ello no es una fuerza deseable. La mayoría de la fuerza de arrastre es generada en la parte trasera del vehículo, cuando la capa límite se separa, su grosor de desplazamiento aumenta bruscamente, esto modifica el flujo potencial exterior y el campo de la presión; es por ello que es necesario disminuir el área de la región de la estela, esto se podría conseguir provocando que el fluido permanezca más junto y reducido en la zona de baja presión en la zona posterior del turismo. Esta manera puede no ser la única de conseguir una disminución en el área de la región de la estela. Un dispositivo que puede reducirlo eficazmente sería aquel que crea turbulencias en la capa límite de modo que el flujo presente más energía. Esta situación también se ve en el diseño de pelotas de golf. Los agujeros en la superficie de la pelota de golf provocan en la capa límite unas turbulencias que reducen el flujo de separación detrás de ella. Causan un cambio del número de Reynolds crítico (transición de laminar a capa límite turbulenta). Este mismo concepto puede ser potencialmente aplicado a otros objetos como es el caso de un turismo.

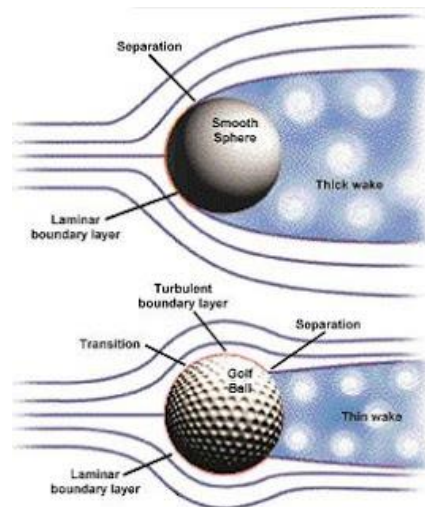


Figura 6.1: Separación capa límite Referencia:

http://3.bp.blogspot.com/_QcPSRUCyrgg/R9CPdjpGu6I/AAAAAAAAA6g/D2S_7XuQ5To/s400/sphere-flow-comparison.jpg

En la separación del flujo, el arrastre de presión es el responsable de la mayoría de la fuerza de arrastre. A fin de reducir el arrastre del objeto, la región de la estela detrás del mismo debe reducirse. Esto se puede llevar a cabo aerodinamizando la forma del objeto o usando otros dispositivos mecánicos: veletas, descargando fluido de velocidad alta, succión, generadores de vórtices.

Debido a que la forma del objeto está fijada, se dispondrá a reducir la región de la estela mediante generadores de vórtices.

Los generadores de vórtices son rampas o cuñas que se colocan justo en la zona anterior al punto de separación de la capa esperada. Los generadores de vórtices son pequeñas piezas que pueden ser de diferente geometría que se extienden perpendicularmente sobre la superficie en la que se encuentran. Se pueden colocar múltiples generadores y son típicamente de la altura de la capa límite.

Son los responsables de transportar momento del flujo de corriente libre hacia la capa límite. Esta mezcla de la capa límite y fluido de corriente libre puede retrasar la separación y disminuir la región de la estela detrás del objeto. Los generadores de vórtices realmente añaden una pequeña cantidad de arrastre debido al arrastre de presión visto en el propio generador del vórtice, sin embargo el arrastre total del sólido se ve disminuido, en gran parte por el efecto de una separación más tardía de la capa límite.

Los generadores de vórtices se usan mayoritariamente en las alas de los aviones, ya que de esta manera se puede controlar la capa límite y su separación, y esto le permite moverse un poco más rápido para mantenerse al corriente del objeto. Con una capa límite que permanece cerca de la superficie del ala, el avión es más fácil de controlar. También se pueden utilizar en los coches; el fluido que recorre el coche, por la forma del mismo coche, tiende a no permanecer todo el rato adjunto al vehículo, especialmente en la parte posterior.

Al introducir los VG, se creará flujo inverso que actuará contra el flujo principal, como se puede observar en el punto C de la figura.

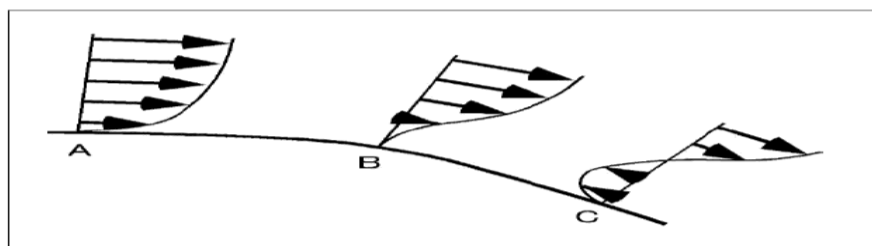


Figura 6.2. Separación capa límite

El punto B es el punto de separación donde el punto de baja presión y el momento de la capa límite se equilibra. Con la adición de los generadores de vórtices, el momento es mezclado de la región superior a la región inferior de la capa límite y entonces el punto de separación se mueve para abajo. Mover el punto de la separación para abajo lleva a cabo

dos cosas: estrecha la región de baja presión que causa el arrastre y aumenta la presión de la región de la separación del flujo. Estos dos efectos juntos disminuyen el arrastre total del vehículo.

Ahora que los factores implicados en la creación del arrastre se han analizado, se procederá a analizar qué es lo que se puede hacer para disminuirlo. Mientras la densidad de aire y la velocidad del vehículo no se pueden cambiar, el área frontal y el coeficiente de arrastre pueden ser modificados. Reducir la altura y la anchura del coche conllevan la reducción del área frontal, pero hay un límite de cómo pequeño esta área puede ser ya que la gente debe ser capaz de sentarse cómodamente dentro del vehículo. Por lo tanto, el método más adecuado para disminuir el arrastre es bajar el coeficiente de arrastre del coche. El coeficiente de arrastre de un vehículo depende predominantemente de la forma del mismo. Por lo tanto, los diseñadores del vehículo cambian aspectos específicos de la forma del cuerpo del el vehículo a fin de reducir el arrastre aerodinámico total y así mejorar las prestaciones. Un método simple que disminuya los efectos de arrastre es construir el cuerpo del coche como una forma muy aerodinamizada, como en un coche de la Fórmula 1 o un coche de carreras. Esta forma aerodinamizada ofrecería la resistencia mínima para expedir el empuje generado por el coche, y de ahí sería propenso al arrastre mínimo. No obstante, un turismo no tiene estas formas aerodinámicas, ya que tampoco es su función, lo que conlleva que posean un coeficiente entre 0.3 a 0.5. De ahí, que se haya que encontrar otro método de reducir los efectos de arrastre.

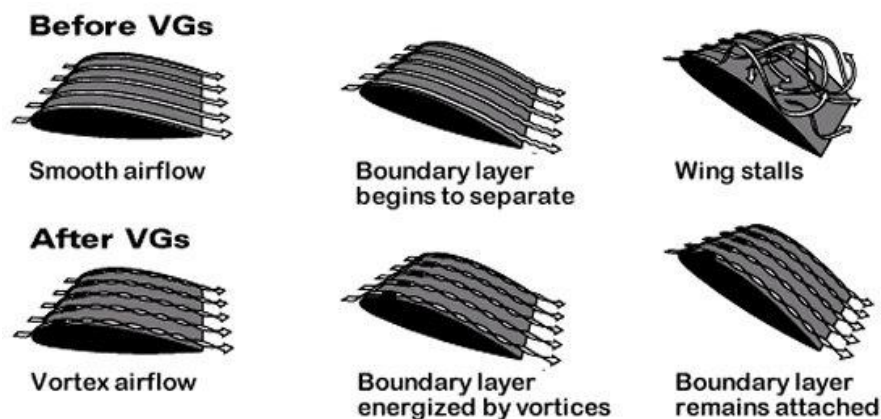


Figura 6.3. Efecto de los VG en la capa límite. Referencia:

<http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/vortex/vortex-generator-effect.jpg>

Los generadores de vórtices son dispositivos de control de la capa límite. El flujo laminar está bien porque no crea mucho arrastre de fricción, sin embargo no ayuda que no lleve

mucho ímpetu, y por lo tanto se separará. El flujo turbulento produce más arrastre de fricción, pero lleva más resistencia a la separación del flujo. Cada generador de vórtices crea un muy delgado hilado de vórtices en la punta superior que lleva mayor energía e ímpetu a la capa límite. Esta energía por su parte crea la turbulencia que retrasa la separación.

6.1. Tipos de VG

Son varias las formas y diseños que se pueden usar a fin de generar vórtices para mejorar las condiciones de la capa límite. No existe un único diseño, en cada caso particular se pueden implementar diferentes geometrías del VG, no obstante no sirve cualquier geometría, ni cualquier disposición de los mismos encima del turismo. En la siguiente figura se puede observar diferentes modelos de VG.

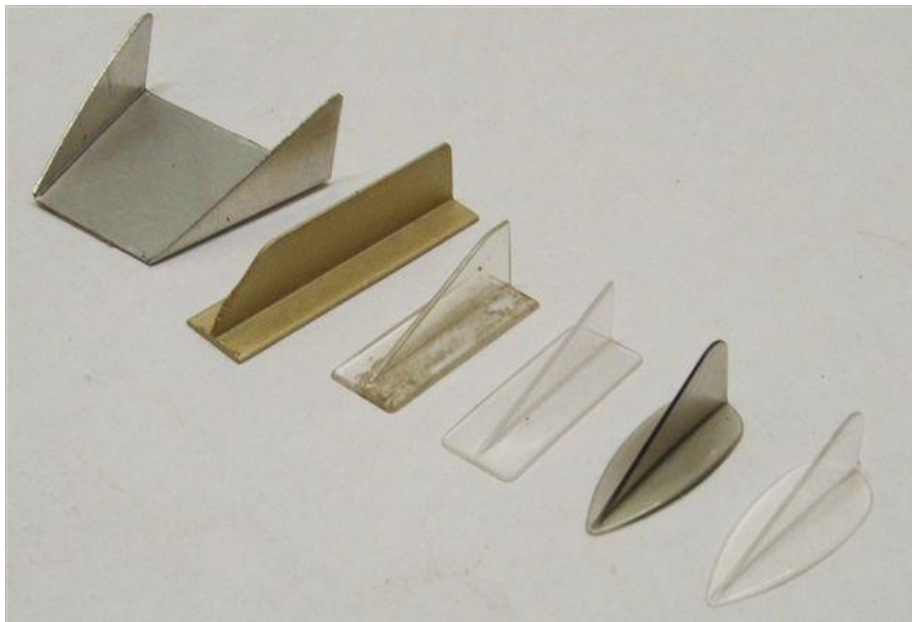


Figura 6.4. Diferentes tipos de VG. Referencia: http://www.stolspeed.com/uploads/images/All_VGs_2.jpg

Los generadores de vórtices se pueden clasificar en dos categorías principales: tipo de veleta y Wheeler. Los de tipo de veleta, son aquellos que se pueden montar en cualquier ángulo (todos iguales) u opuestos entre sí. Del tipo Wheeler, son aquellos formados como espoletas o como dos rampas consecutivas conocidas como dobletes.

En este caso se ha optado por un diseño tipo delta que es de tipo veleta, ya que era un diseño sencillo, hecho que no dificultaba mucho al diseñarlo, además no tiene un área frontal muy grande, factor que provocará que induzca un arrastre extra menor y también porque pensando un poco en el diseño del turismo, se ha pensado que quizás era de los

menos aparatosos. Más adelante se especificarán las dimensiones del mismo.

6.1.1. Airtab

Un Airtab es un generador de vórtices de tipo espoleta, se diseña especialmente para disminuir el arrastre aerodinámico de los remolques del tractor. Los Airtabs se fabrican de modo que el dispositivo se extiende fuera de la capa límite sin ningún borde puntiagudo. Son aproximadamente unos 25mm de alto, 100mm de largo, y 125mm de ancho

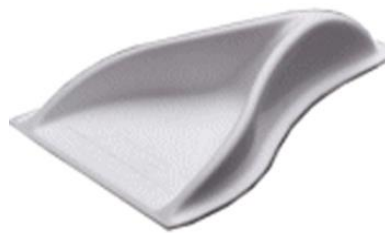


Figura 6.5. VG tipo Airtab. Referencia: <http://www.dansdata.com/images/blog/gaspods/airtab.png>

6.1.2. Aleta

El generador de vórtices tipo aleta son aquellos que la parte que se levanta forma exactamente 90 grados con la superficie plana. Un dispositivo de vórtices tipo aleta como bien su nombre indica tiene una forma que recuerda a una aleta de tiburón.



Figura 6.6. VG tipo aleta. Referencia: <http://www.rapid->

racer.com/resources/Aerodynamics/Aero_Up/Vortex/Vortex%20Generators1.jpg?timestamp=1453129516339

6.1.3. Rectangular

El generador de vórtices rectangular es simplemente una placa plana en la cual la zona perpendicular es también una placa plana de mayor superficie en la cual se monta. Se puede montar en la dirección paralela al fluido o con una cierta orientación. Si hay un ángulo, los generadores de vórtices pueden compartir el mismo ángulo, o cada pareja de generadores se pueden montar en un ángulo igual pero opuesto. Este tipo de generador de vórtices se utiliza sobre todo si la referencia que se tiene es el grosor de la capa límite. Son eficaces en el control de la separación usando un flujo localizado en una corta distancia, además generan una pequeña cantidad de arrastre debido a su talla. Acostumbran a ser 30 mm de alto que suele estar cerca de la altura de la capa límite, 60 mm de largo que es dos veces la altura y unos 2mm de grueso.

6.1.4. Delta

El siguiente tipo de generador de vórtices son los llamados delta. Este tipo de generador provoca que se pueda extender la capa límite sin crear demasiado arrastre ya que carece de mucha superficie para ello. La punta del extremo es todo lo que necesita prácticamente para generar el remolino o vórtice. Es relativamente grueso en comparación con los similares a este tipo (5mm), pero sigue la misma regla que el generador de vórtices anterior donde la longitud es dos veces la altura. Estos generadores de vórtices son fáciles de fabricar y proporcionan un vórtice sustancial en la punta.

7. GEOMETRÍA DEL TURISMO SIN VG

7.1. Introducción a la geometría

En este capítulo, se va a tratar cómo se ha ido obteniendo la geometría, con el fin de poderla introducir en el programa de elementos finitos. Para plantear el problema, se ha optado por partir de una geometría establecida, obtenida de la referencia: http://solidworks.cad.de/lib_fahr01.htm

Se ha llegado a la conclusión de que trabajar con SolidWorks® puede resultar interesante, debido a la cantidad de archivos que existen para SolidWorks®, además es un programa el cual la escuela nos da la licencia, lo que ha permitido trabajar fácilmente con él.

Se ha optado por la geometría de un VW Golf, no ha sido escogido por ninguna particularidad, simplemente se necesitaba disponer de un modelo de un turismo base. Uno de los factores que ha ocasionado escoger este modelo, es que estaba en el formato del programa en que se trabajaba, es cierto que había muchos modelos en este programa, hecho que ha ayudado a decidir trabajar en este programa, pero la mayoría de modelos tenían ciertos problemas cuando eran importados al programa de elementos finitos, ya que esos modelos eran tratados como superficies, mientras que el programa solo operaba con sólidos.

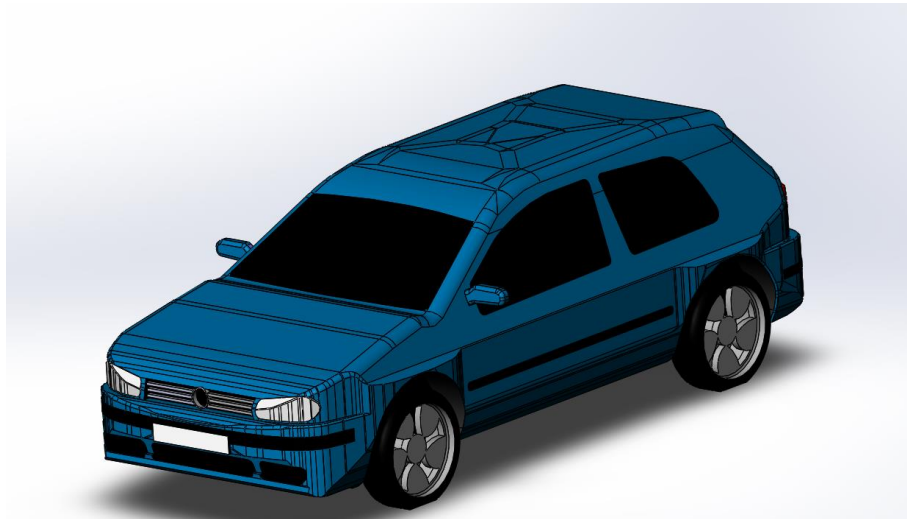


Figura 7.1. Geometría inicial del turismo.

7.2. Tratamiento de la geometría

Una vez importada y analizada la geometría, se han podido observar cuáles son los principales defectos que ésta tiene. En primer lugar, se observa que la geometría exterior, tiene muchos detalles. Tiene demasiados detalles que lo único que harían sería hacer mayor el esfuerzo de computación que llevaría a cabo el programa Ansys®. Es por eso que primeramente se procede a eliminar todos aquellos detalles que son puramente estéticos. Para realizar esta operación se ha trabajado desde dentro del SolidWorks® y se han ido suprimiendo todas aquellas operaciones y croquis que no eran necesarios.

Además, se tiene una limitación en el programa de elementos finitos ya que se trabaja con una versión de estudiante, y por otro lado, no se había decidido en ningún momento trabajar con el modelo VW Golf. Es por ello que se ha decidido simplificar todavía más la geometría, no solo todos aquellos detalles que eran más puramente estéticos, sino que se ha simplificado de tal manera que no sea reconocible de primeras como el modelo del cual procede. Así pues, el modelo ha quedado en un sólido en forma de turismo que recuerda un poco la forma al modelo mencionado anteriormente.

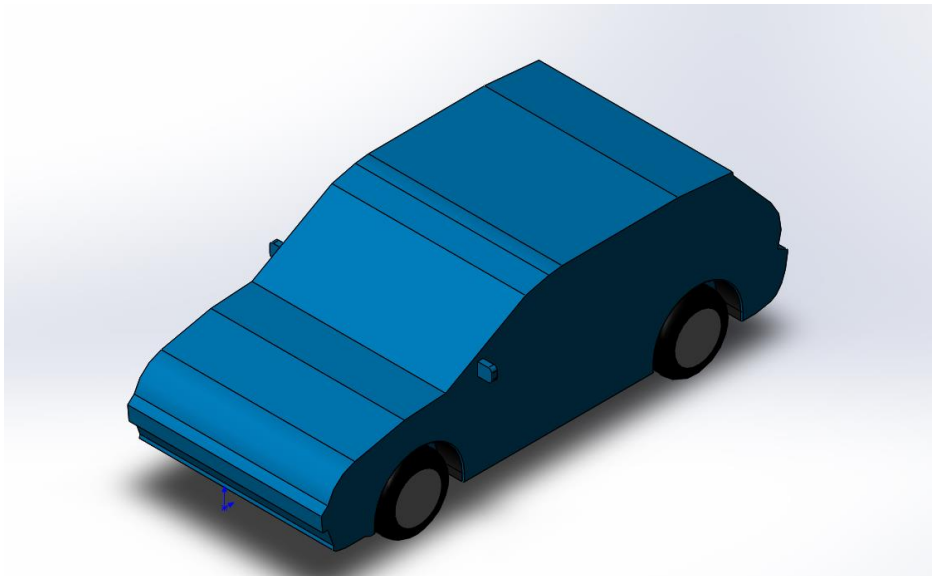


Figura 7.2. Geometría simplificada del turismo.

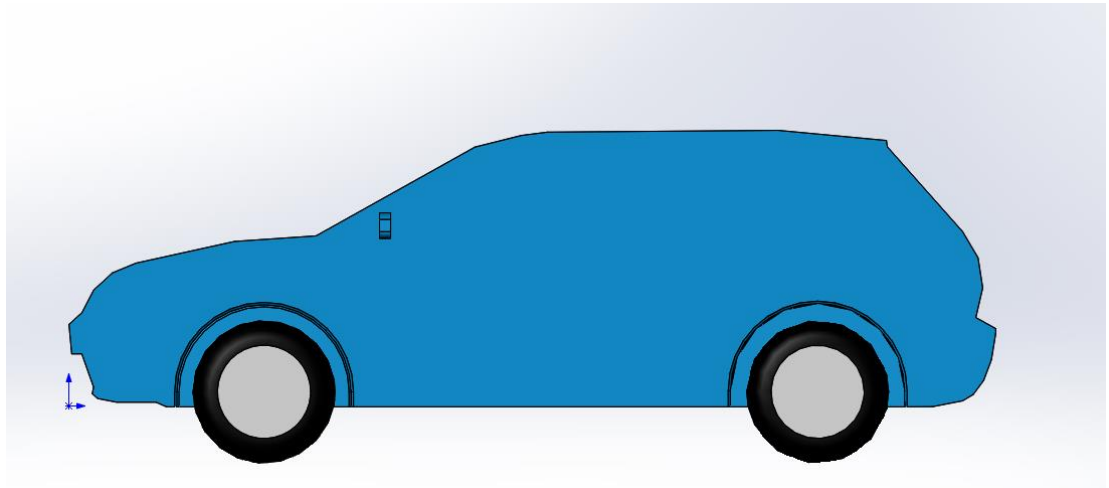


Figura 7.3. Vista lateral geometría simplificada

7.3. Programa de elementos finitos

7.3.1. Descripción del proceso

En capítulos anteriores, se ha visto cómo tratar la geometría para adecuarla a nuestro problema. Una vez obtenida la misma, es necesario introducirla en un programa de elementos finitos para obtener los resultados aerodinámicos. El programa que se va a usar es Ansys®, con el paquete Fluent® de CFD.

Para tener esos datos es necesario hacer los tres pasos que hay que realizar dentro del Ansys® de manera adecuada: Geometría, Malla y Fluent®. A continuación, se expondrá, de una manera más detallada, los pasos que se han seguido para cada una de las partes.

Aunque se tenga la geometría definida, hay que realizar algunas operaciones antes de poder medir las fuerzas que actúan sobre el vehículo. En primer lugar tendremos que dejar la geometría definitiva realizada. A pesar de que lo que se haya estado haciendo a lo largo del apartado anterior sea un coche, lo que se quiere obtener es el hueco que deja el coche en una caja, de unas dimensiones determinadas. Es por eso que hay que hacer un pre-tratamiento de la geometría.

El siguiente paso será el mallado de la geometría. Dado que los elementos finitos analizan divisiones pequeñas de la geometría, habrá que crear una malla de manera adecuada. Tiene que ser suficientemente pequeña para conseguir el análisis correcto, pero tampoco demasiado pequeña. De esta forma el cálculo será relativamente más rápido y no se

sobrepasará el límite de Fluent® con el número de celdas que puede mallar en la versión de estudiante.

Por último, se procederá a usar Fluent®. Con Fluent®, se puede obtener los datos necesarios para conocer las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el vehículo. De esta manera se pueden extraer conclusiones y usar los datos que se tienen, de una forma adecuada.

7.3.2. Design Modeler de Ansys®

La primera parte, trata del Design Modeler. Es el programa que se encarga de la geometría en Ansys® y es fundamental para acabar de definir la geometría. El principal problema que aparece una vez tenemos el coche definido es que lo que se quiere analizar es el aire que rodea al mismo y no el coche en sí, es por eso, que lo que hay que realizar es lo que se denomina como una operación de sólidos. Hay que crear una caja, en la cual esté contenido el coche y posteriormente, usar el coche para quitar superficie a la caja.

En primer lugar, hay que importar la geometría. Para evitar problema de compatibilidad entre el Software de Ansys® y el de SolidWorks®, se usará un fichero .STEP. Una vez se realice la importación de la geometría, hay que crear la caja que contiene el sólido.

Para esta problemática, se ha decidido crear una caja como volumen de control. La caja medirá 4m de anchura, 4m de altura y 12m de largo y 6m por delante del vehículo, todas estas medidas son desde el vehículo. Es la caja que contendrá todos los elementos y por lo tanto, la mayor zona de estudio. Fuera de dicha caja, no hay nada que afecte a las fuerzas aplicadas al coche.

Las dimensiones de las cajas han sido escogidas con el objetivo de conseguir la máxima información posible con el mínimo número de espacio.

El siguiente paso, consiste en implementar las operaciones de sólidos. Éstas son las que permiten definir la geometría como será finalmente. Para crearlas, basta con ir a crear Boolean Operation en Design Modeler, elegir Subtract dentro de las operaciones permitidas y por último seleccionar los volúmenes que van a ser utilizados. Finalmente se ha partido la geometría por su eje de simetría.

Se ha decidido analizar sólo la mitad del vehículo debido a su simetría, hecho que ha permitido utilizar menor número de celdas y menor tiempo de computación.

La geometría que finalmente se pasará al mallado se muestra en la Figura 7.4.

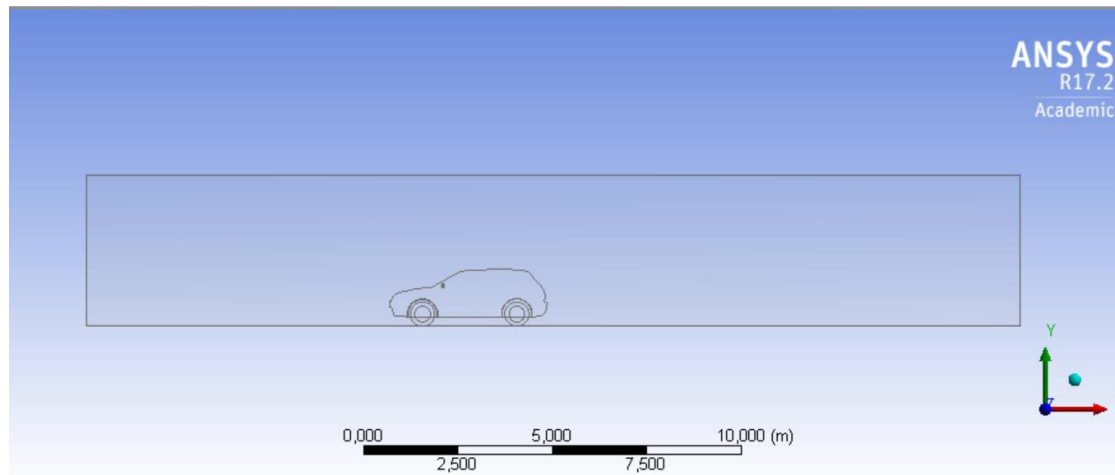


Figura 7.4. Geometría importada al programa de simulación

7.3.3. Mallado

Después de obtener la geometría, el siguiente paso a realizar es el mallado. El mallado es una parte muy importante del análisis de elementos finitos. Sin mallar no sería posible realizar los cálculos para resolver la problemática. Consiste en dividir la geometría a estudiar en volúmenes pequeños con tal de facilitar el cálculo y hacerlo más abaricable.

El límite principal es el que impone Fluent® a la versión educacional, que es la que se ha usado para este trabajo, es de 512.000 celdas, lo que significa que a partir de ese número, el programa no nos resolverá el problema, es decir, podremos mallar utilizando un número mayor de celdas a lo permitido, pero cuando se deba resolver el programa no nos lo permitirá al ser éste una versión educacional.

No obstante no es la única limitación existente, a mayor número de celdas, mayor tiempo de computación, tanto como para mallar el sólido como para resolver y analizar los resultados.

Se sabe que cuanto mayor es el número de nodos en el mallado, mayor es el tiempo de cálculo. Por esta razón, se estima que con muchas más celdas, el cálculo sería bastante más extenso en tiempo y por tanto, menos viable para realizar iteraciones. Respetando el límite de 512.000 las simulaciones duran unos cuarenta minutos, tiempo más que factible para realizar varias iteraciones en un periodo de tiempo no necesariamente extenso.

El mallado es un procedimiento más complejo de lo que parece. No se puede mallar de cualquier manera y todas las geometrías de igual forma. La calidad de la malla ayuda a un mejor procesado de la geometría y a la obtención más realista de la solución del problema, por lo que es interesante conocer los parámetros que afectan a su calidad.

En primer lugar, como guía dentro del mismo programa se ha usado el parámetro Skewness, este parámetro tiene en cuenta la desviación que tiene la malla con la figura geométrica que representa la malla, fijándose en los ángulos de los vértices. Cuanto menor sea el parámetro, mejor será la malla. También se ha utilizado el parámetro Orthogonal Quality, como mayor sea este parámetro mayor calidad presentará el mallado.

Se ha decidido utilizar diferentes métodos de mallado para comparar sus resultados entre sí, según el método la calidad de la malla ha sido mejor o el tiempo de computación menor.

https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2014/11/MESHING_WORKSHOP_2014.pdf

Consultando a la referencia anterior se ha podido determinar qué tipos de mallado eran más adecuados, y que funciones diferentes permitían cada uno.

Método CutCell: La mayor ventaja de este método es que se consigue fácilmente un mallado hexa predominante que además permite utilizar la herramienta Inflation para captar los efectos en el contorno. Además converge bastante más rápido que el mallado tetra/prism.

Método Tetrahedrons: Permite una mayor calidad en la malla, hecho que provoca un mayor tiempo de computación. También admite la herramienta Inflation. Además se le puede añadir la opción Patch Independent que es usada para geometrías con muchos pequeños detalles.

En todos los métodos se ha procedido a utilizar la herramienta Inflation alrededor del vehículo, ya que permite un estudio más refinado de la capa límite, que es justamente lo que más nos interesa en este estudio, cómo se desarrolla la misma. No obstante al introducir esta herramienta, la calidad del mallado se ha visto perjudicada y ha dificultado un poco su mallado final, a pesar de ello se ha considerado que era mejor poder analizar con más detalle la capa límite y perder un poco de calidad del conjunto de la malla. Dentro de esta herramienta se ha optado por la opción First Aspect Ratio, ya que se como comenta en la referencia:

http://www.southampton.ac.uk/~nwb/lectures/GoodPracticeCFD/Articles/Ext_Aero_Best_Practice_Ver1_2.pdf

es una buena opción para estudiar la capa límite en vehículos.

Finalmente se ha optado por el método Tetrahedrons ya que presentaba unos valores en los parámetros de calidad mejores que el método CutCell. Al mallar mediante el método Tetrahedrons se ha conseguido un valor mínimo de Orthogonal Quality en muy pocas celdas de 0,1161 y un valor medio de 0,85235, mientras que se ha logrado un valor

máximo en el parámetro Skeewness de 0,97676 y un valor medio de 0,24794.

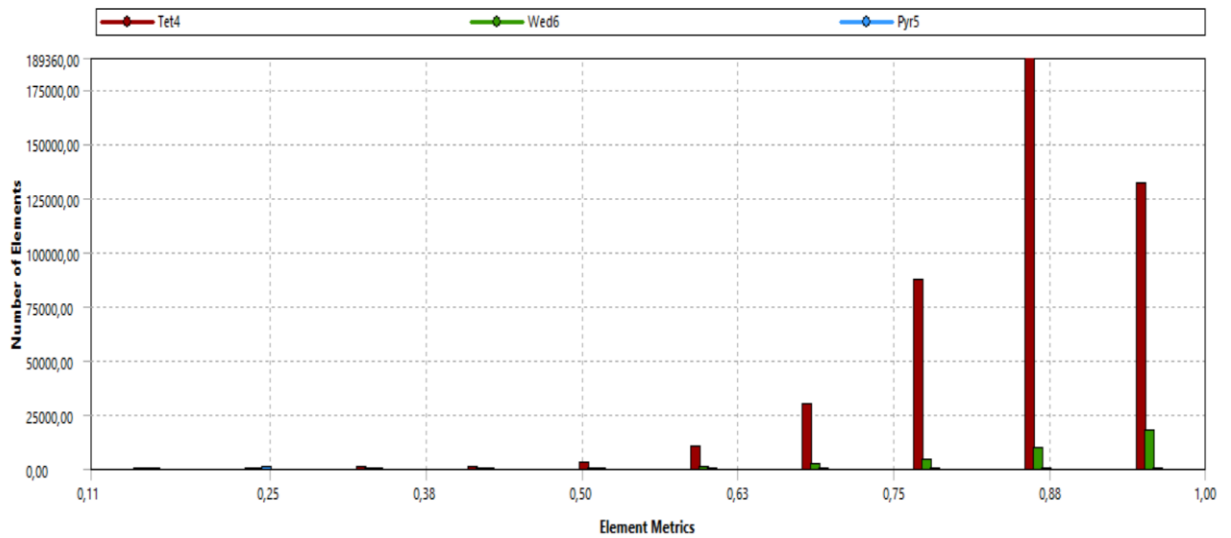


Figura 7.5. Parámetro Orthogonal Quality del mallado

Como se puede apreciar en la figura anterior la mayoría de los elementos de la malla tienen un valor superior a 0,75, provocando así que la calidad de la malla sea considerada como muy buena. Solamente hay alguna celda que se sitúe por debajo de 0,15 que es considerado como una mala calidad.

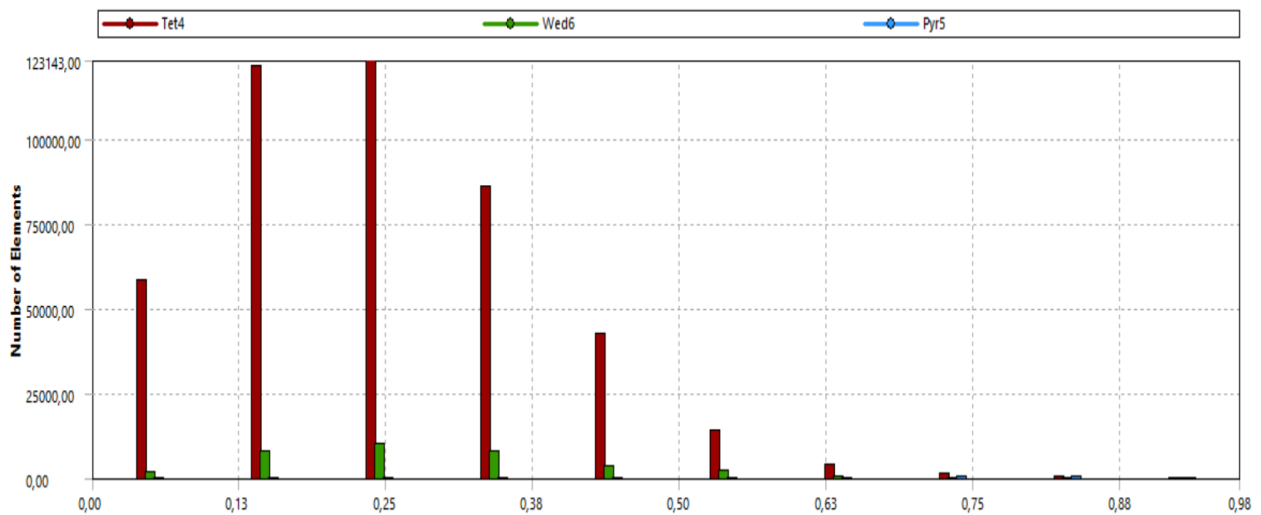


Figura 7.6. Parámetro Skeewness del mallado.

En la figura anterior se aprecia como todos los valores del parámetro Skeewness están por debajo de 0,98, hecho que provocaría que la malla fuera inaceptable, también se puede ver como la mayoría de elementos están por debajo de 0,4, dato que está considerado como una calidad muy buena.

Skewness mesh metrics spectrum

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Orthogonal Quality mesh metrics spectrum

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Figura 7.7. Valoración de los parámetros de calidad. Referencia: https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2014/11/MESHING_WORKSHOP_2014.pdf

En la figura anterior se muestran las diferentes valoraciones de la calidad de la malla en función del valor de los parámetros: Skewness y Orthogonal Quality.

El último paso a realizar es nombrar las superficies correctamente. El objetivo es poder aplicar de manera correcta las condiciones de contorno en cada una. Para nombrar una superficie es necesario seleccionarla y a continuación crear una Name Selection.

Se definirán 7 Name Selection: el Suelo o Road, las 3 caras alargadas restantes definidas como Symmetry 1, 2 y 3, la cara anterior llamada Inlet, la posterior, llamada Outlet y por último, todas las superficies que engloban el coche, llamada car. El resultado del mallado, se mostrará en la Figura 7.8.

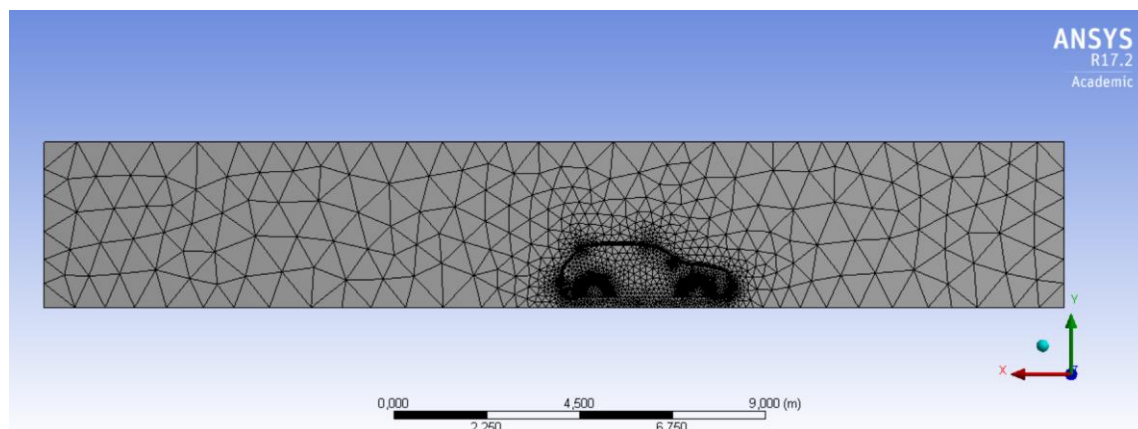


Figura 7.8. Mallado geometría

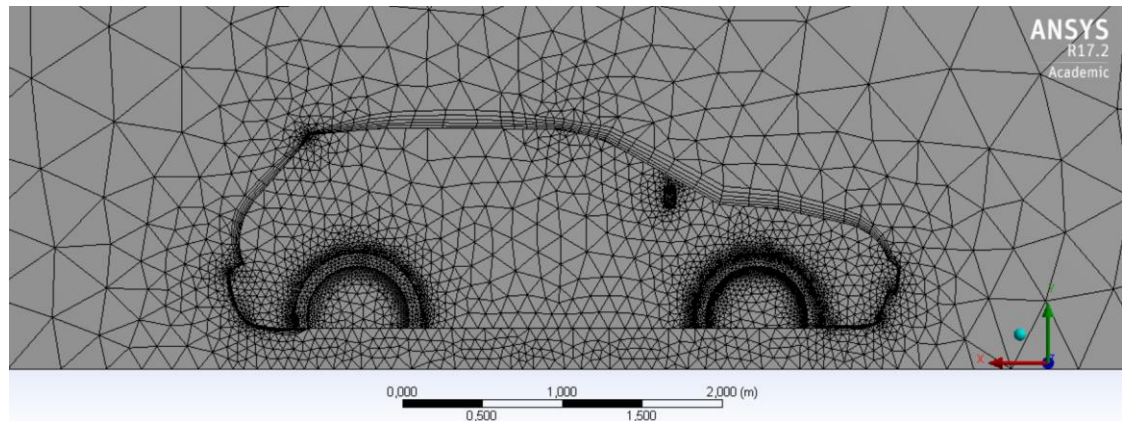


Figura 7.9. Mallado detallado del vehículo.

7.3.4. Ansys Fluent®

Después de realizar el mallado, el único punto que falta sería el análisis del problema que se ha planteado a lo largo de todo el trabajo, que es el problema de conocer las fuerzas de arrastre y sustentación que afectan al vehículo.

Para comenzar el análisis, es necesario definir las condiciones de contorno. Impondremos que la velocidad del coche sea de 35 m/s, que es una velocidad que la mayoría de turismos pueden alcanzar en autopista.

El primer paso es seleccionar el tipo de modelos de resolución queremos usar. Al ser un problema aerodinámico sin que tenga en cuenta ninguna influencia de temperatura, se empezó utilizando el modelo SST k- ω , ya que es el modelo que estudia mejor casos referentes a capa límite, no obstante se tuvo que desestimar esta opción a medida que se empezó a simular ya que el tiempo de computación para que convergiera la solución era demasiado elevado, es por eso que se decidió utilizar el modelo viscoso de tipo K-Epsilon, Realizable y Non-Equilibrium Wall Functions. El modelo Realizable es el que más tiene en cuenta la turbulencia y el tiempo de computación no es excesivo, hecho que ha permitido realizar las simulaciones necesarias para el estudio. Al escoger Non-Equilibrium Wall Functions se consigue mejorar los resultados en aquellos casos donde haya separación. De esta manera era posible resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, asegurar la continuidad y tener en cuenta tanto la turbulencia como la capa límite. En la tabla que se adjunta a continuación se muestran las diferentes características para cada método. Todos estos métodos se basan en el modelo RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) lo que les permite solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes.

Model	Behavior and Usage
Spalart-Allmaras	Economical for large meshes. Performs poorly for 3D flows, free shear flows, flows with strong separation. Suitable for mildly complex (quasi-2D) external/internal flows and boundary layer flows under pressure gradient (e.g. airfoils, wings, airplane fuselages, missiles, ship hulls).
Standard k-ε	Robust. Widely used despite the known limitations of the model. Performs poorly for complex flows involving severe pressure gradient, separation, strong streamline curvature. Suitable for initial iterations, initial screening of alternative designs, and parametric studies.
RNG k-ε	Suitable for complex shear flows involving rapid strain, moderate swirl, vortices, and locally transitional flows (e.g. boundary layer separation, massive separation, and vortex shedding behind bluff bodies, stall in wide-angle diffusers, room ventilation).
Realizable k-ε	Offers largely the same benefits and has similar applications as RNG. Possibly more accurate and easier to converge than RNG.
Standard k-ω	Superior performance for wall-bounded boundary layer, free shear, and low Reynolds number flows. Suitable for complex boundary layer flows under adverse pressure gradient and separation (external aerodynamics and turbomachinery). Can be used for transitional flows (though tends to predict early transition). Separation is typically predicted to be excessive and early.
SST k-ω	Offers similar benefits as standard k-ω. Dependency on wall distance makes this less suitable for free shear flows.
Reynolds Stress	Physically the most sound RANS model. Avoids isotropic eddy viscosity assumption. More CPU time and memory required. Tougher to converge due to close coupling of equations. Suitable for complex 3D flows with strong streamline curvature, strong swirl/rotation (e.g. curved duct, rotating flow passages, swirl combustors with very large inlet swirl, cyclones).

Tabla 7.1. Características de los modelos de simulación. Referencia:

http://www.southampton.ac.uk/~nwb/lectures/GoodPracticeCFD/Articles/Turbulence_Notes_Fluent-v6.3.06.pdf

Otra condición de contorno que se debía imponer era la del fluido. Se ha escogido que el material del fluido fuera el aire y se han dejado las propiedades que vienen por defecto propias del aire.

Para el caso de la entrada, que sería la cara frontal a la parte delantera del vehículo, se le ha puesto una restricción de tipo Velocity Inlet, es decir, una entrada de velocidad. Para el valor de la velocidad del aire a la entrada se utilizará 35m/s, que es el valor que se ha mencionado anteriormente con el que se realizarán las simulaciones. Y en los valores para el método turbulento se ha puesto un 1% en Turbulent Intensity y 10 en el Turbulent Viscosity Ratio.

La siguiente superficie a modificar es la salida, definida como Pressure Outlet o salida de presiones. En esta ocasión, simplemente habrá que dejar el modelo de turbulencia como está. La última superficie de la cual hay que modificar los parámetros es el suelo. Nuestro problema es el referido a un coche que se mueve respecto al asfalto. No obstante, en este caso se va a tratar un coche que está quieto, dónde el suelo y el aire se mueven a una velocidad idéntica y en sentido contrario al coche. Lo que se definirá en esta superficie, será que la velocidad del suelo es también 35 m/s y viajará en el sentido contrario al coche.

También se deberá modificar los Reference Values, aplicando para que el flujo empiece en el Inlet y que el valor de la velocidad sea por tanto de 35m/s y también se deberá modificar el área, ya que para los cálculos necesarios el área que se requiere es el área frontal del vehículo, que en este caso ha resultado ser de 1,377m².

Por otro lado se ha modificado el Solution Method y el Solution Control: se ha decidido cambiar el Schema a Coupled, el valor de Pressure se ha puesto como Standard, los demás valores se han mantenido como venían por defecto. También se ha modificado el Flow Courant Number a 50 y las relajaciones de los factores de Momentum y Pressure a 0,25.

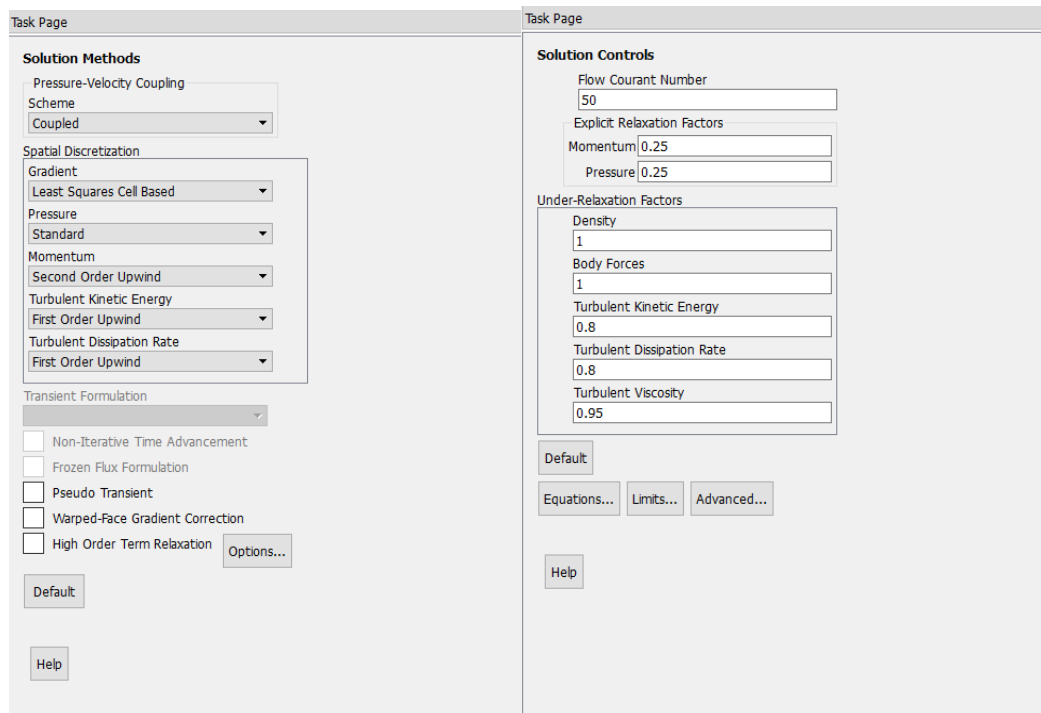


Figura 7.10. Valores introducidos en el Fluent®.

Finalmente hay que pedir al programa que nos devuelva lo que queremos calcular, por eso en el apartado de Monitors, se añade para poder ver en pantalla el CD y el CL.

Se inicializarán los valores y por último se dará a calcular 700 iteraciones. La simulación puede no llegar a acabar ya que puede converger antes de llegar a las 700 iteraciones.

La convergencia o no de la simulación depende del tipo de programa y los valores de los residuos. Los residuos, son los valores que indican a Ansys® cuando una solución ha convergido o cuando no. Estos valores se pueden definir por el usuario. En este caso, se tomará 0,001 para todos los residuos. Por ese mismo motivo, cuando en una sucesión de iteraciones, el resultado fluctúa entre unos valores muy similares se procederá a pausar la iteración y adquirir los valores últimos del proceso.

8. DISEÑO VG

Como se ha comentado antes hay muchos diferentes diseños que pueden ser usados como generadores de vórtices, pero dentro de esta diversidad hay unos parámetros que deben ser cumplidos para que la pieza en cuestión actúe como un generador de vórtices y no como cualquier otra cosa. Como la forma del generador es arbitraria, aquí se ha decidido utilizar la forma delta ya que era un diseño bastante sencillo, poco aparatoso, hecho que estéticamente será favorable para el diseño en conjunto con el turismo.

Antes de empezar a diseñar nada es necesario determinar el número de Reynolds (ecuación (8.1)) con el que se operará.

$$Re = \rho u l / \mu = 3,66 \cdot 10^6 \quad (8.1)$$

Dónde:

$$\rho = \text{densidad del aire} = 1,225 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$\mu = \text{viscosidad dinámica} = 1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ [kg/m} \cdot \text{s]}$$

$$u = \text{velocidad del flujo} = 35 \text{ [m/s]}$$

$$l = \text{longitud característica} = \text{raíz cuadrada del área frontal} = 1,53 \text{ [m]}$$

Una vez determinado el número de Reynolds es posible calcular el grosor de la capa límite, parámetro que será clave para determinar la altura del VG.

El grosor de la capa límite turbulenta en este caso procede de la ecuación (8.2) siguiente:

$$\delta \approx 0.382 L / Re^{1/5} \text{ [m]} \quad (8.2)$$

Aplicando el número de Reynolds acabado de calcular, se encuentra que hay un grosor de capa límite de 28,44mm

Se ha decidido mantener constante el grosor del VG en 5mm, ya que se ha considerado que era suficientemente pequeño y que si fuera más o menos grueso solo influiría en la fuerza de arrastre local en el VG, pero en el conjunto del turismo es despreciable.

Por último, falta por determinar la posición en el vehículo de los VG, se han posicionado en la parte posterior del techo, ya que es el punto donde se desprende la capa límite. Se han equidistanciado según el tipo de orientación, cuando el ángulo es nulo o es el mismo a lado y lado la separación entre dos VG es de 100mm, mientras que si están orientados en parejas con ángulos opuestos, cada eje de cada pareja está separado 200mm y cada VG

de la pareja a 57mm.

8.1. Parámetros

8.1.1. Altura

La altura es uno de los parámetros claves que debe ser determinado para que el generador de vórtices actúe como se desea y no produzca el efecto contrario. A fin de que se creen los vórtices de corriente en la parte más alta del VG y retrasen el desprendimiento de la capa límite; los VG tienen que tener una altura cercana al grosor de la capa límite, es por ellos que se ha probado tres alturas diferentes para poder determinar así cual era la altura óptima. Al determinar la altura queda determinado también la longitud del mismo y el grosor se ha mantenido constante en todos los casos.

Al tener un grosor de capa límite de 28,44mm se ha procedido a comparar las siguientes alturas: 15mm, 20mm y 25mm.

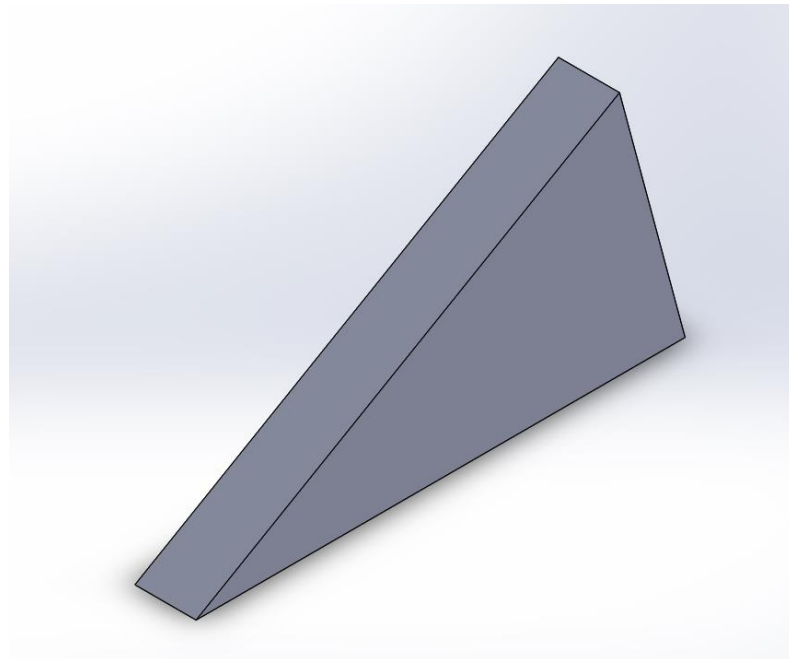


Figura 8.1. VG altura (20mm)

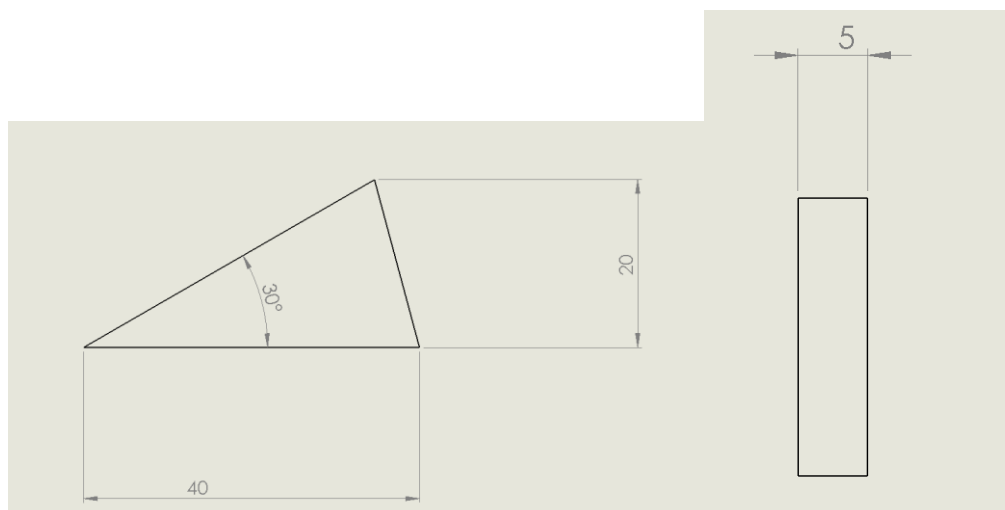


Figura 8.2. Medidas VG

8.1.2. Orientación

Una vez determinada la altura óptima se considerado necesario determinar el ángulo de los VG respecto al flujo, partiendo de la base que no había inclinación respecto al flujo se ha decidido orientar los VG de diferentes maneras para estudiar el comportamiento del coeficiente de arrastre. Se ha estudiado una misma orientación para cada pareja de VG, de tal manera que entre los miembro de cada pareja estaban orientados de forma opuesta.

También se han orientado las parejas de forma opuesta pero esta vez de forma decreciente, de tal manera que los VG del eje del turismo tenían un ángulo máximo de orientación y a medida que se alejaban del eje este ángulo iba disminuyendo.

Por último los VG han sido orientados con el mismo ángulo a lado y lado del eje del turismo.

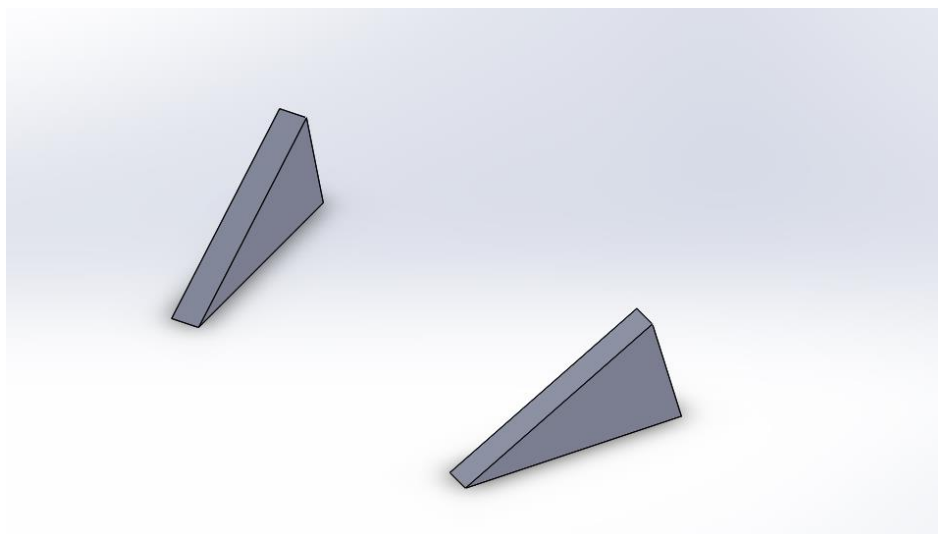


Figura 8.3. VG con orientación opuesta entre sí.

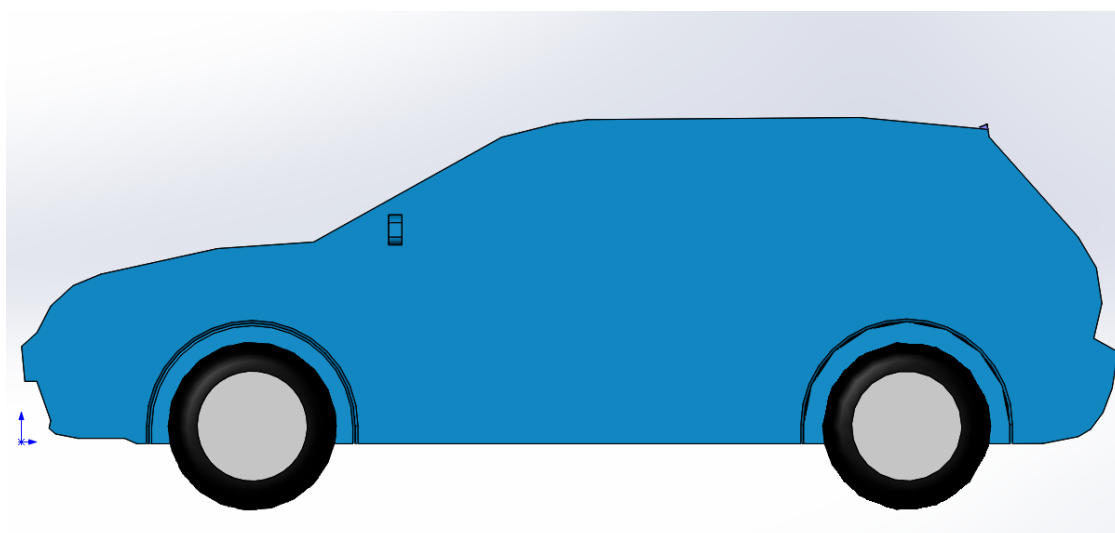


Figura 8.4. VG implementados en el turismo

9. RESULTADOS

9.1. Comparación CD y CL

9.1.1. Parámetro: Altura

	CD	CL	Relación CL/CD	% Mejora (CD)	% Mejora CL
Sin VG	0,4256	-0,23403	0,54988		
H=17	0,416366667	-0,251623333	0,60433	-2,2175967	6,991932
H=20	0,39631	-0,248647	0,6274	-7,390679	5,878489
H=25	0,411683333	-0,26717	0,64897	-3,3804299	12,404087

Tabla 9.1. Resultados CD y CL en función de la altura.

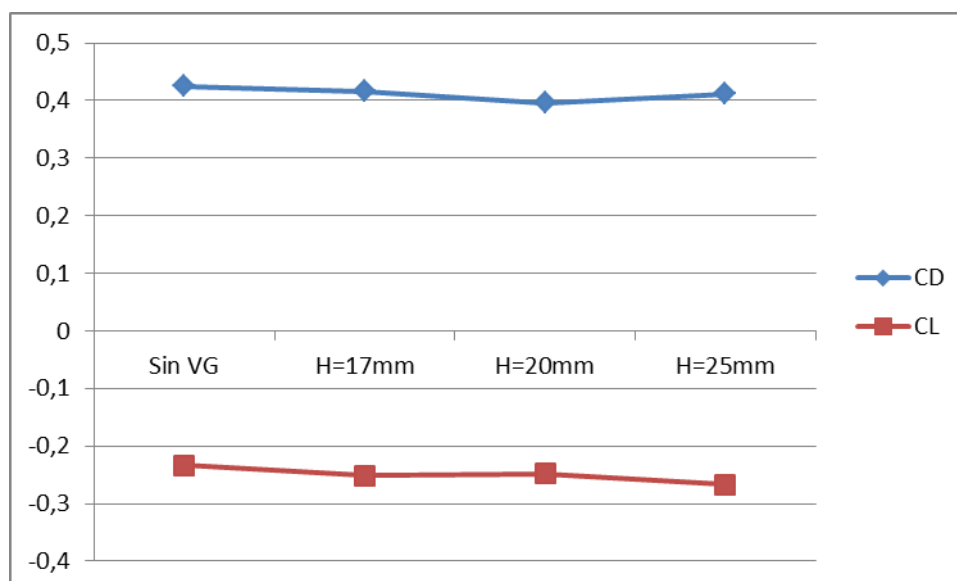


Figura 9.1. Evolución de los coeficientes según la altura.

Como se puede apreciar en los gráficos anteriores al añadir los VG al turismo se reduce el coeficiente de arrastre, lo que provocará que la fuerza de arrastre sea menor. Todas las diferentes alturas de los VG mejorarán el rendimiento del turismo, no obstante para el caso de una altura de 20mm será el caso donde haya una mayor mejora, por lo que será la altura escogida. De los resultados obtenidos se puede afirmar que se necesita una altura

del VG cercana al grosor de la capa límite, no obstante el término de valor cercano se refiere a valores del 70% aproximadamente del valor de la capa límite, ya que como se observa para la altura de 20mm se obtienen los mejores resultados, mientras que para valores cercanos al 90% del grosor (25mm), los resultados son peores.

9.1.2. Parámetro: Orientación

9.1.2.1. Ángulos opuestos

	CD	CL	CL/CD	% CD	% CL
Ángulo=0	0,39631	-0,21621	0,5455		
Ángulo=10	0,38956	-0,18996	0,4876	-1,73	13,81
Ángulo=15	0,41383	-0,27292	0,6595	4,23	20,77

Tabla 9.2. Resultados de los coeficientes al añadir VG orientados con ángulos opuestos.

Al orientar los VG como parejas opuestas ha ocasionado, en el caso de 10°, poder mejorar el CD, no obstante el CL se ha visto muy perjudicado provocando así una peor relación. En el caso de la orientación a 15° solo se consigue mejorar el CL respecto el caso inicial. Al obtener estos resultados, no se ha creído conveniente aumentar el ángulo de orientación ya que como los resultados al aplicarle 15° no mejoraban los resultados, un aumento en la orientación sólo podía conllevar a unos resultados todavía peor.

9.1.2.2. Ángulo decreciente

	CD	CL	Relación CL/CD	% CD	%CL
Ángulo=0	0,39631	-0,21621	0,5455		
Ángulo=10	0,39321	-0,26106	0,6639	-0,788	17,18
Ángulo=15	0,40276	-0,16975	0,42146	1,6	27,36

Tabla 9.3. Valores de CD y CL al añadir VG con una orientación inicial decreciente.

Como se observa en la tabla, el hecho de dotar a los VG centrales con una cierta inclinación respecto al flujo ha permitido mejorar los parámetros a estudiar, en el caso de aplicar 10° ha habido una ligera mejora del CD y una mejora considerable del CL, provocando así la mejor relación. Sin embargo, al aumentar dicha inclinación se empeoran

ambos resultados, por lo que este caso no sería una mejora del modelo inicial, y por este mismo motivo se ha desestimado seguir aumentando la inclinación.

9.1.2.3. Mismo ángulo

	CD	CL	CL/CD	%CD	%CL
Ángulo=0	0,39631	-0,21621	0,5455		
Ángulo=10	0,40168	-0,25425	0,6329	1,33	14,96
Ángulo=15	0,40752	-0,16126	0,3957	2,75	34

Tabla 9.4. Valor de los coeficientes al añadir VG con una misma orientación a lado y lado del eje.

En este caso, al tener todos los VG a lado y lado del eje con la misma orientación ha generado que el CD no mejorase en ningún caso, a pesar de que cuando están orientadas a 10° la variación es muy pequeña; y como el CL mejora bastante, la relación definitiva es mejor que en el caso base. Por otro lado al orientarlos con 15° no se consigue ninguna mejora. Analizando estos resultados se puede decir que orientando los VG con el mismo ángulo a lado y lado del eje de simetría no se consigue ninguna mejora.

9.2. Simulación

9.2.1. Sin VG

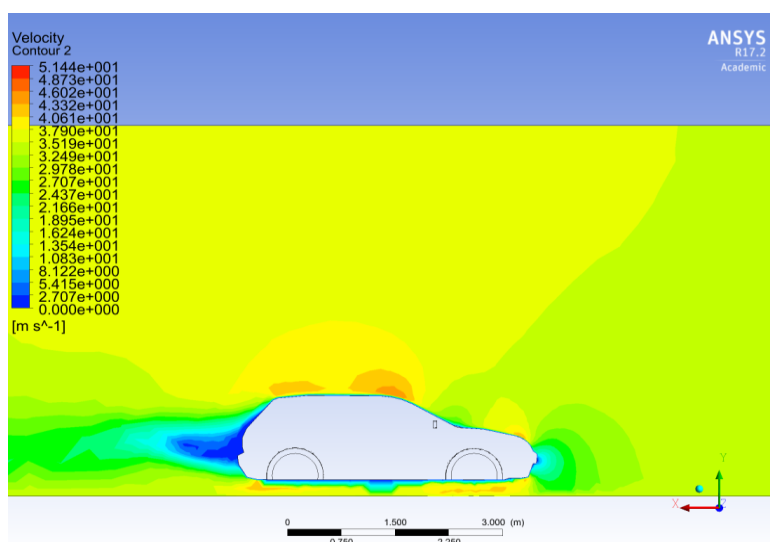


Figura 9.2. Contorno de velocidades.

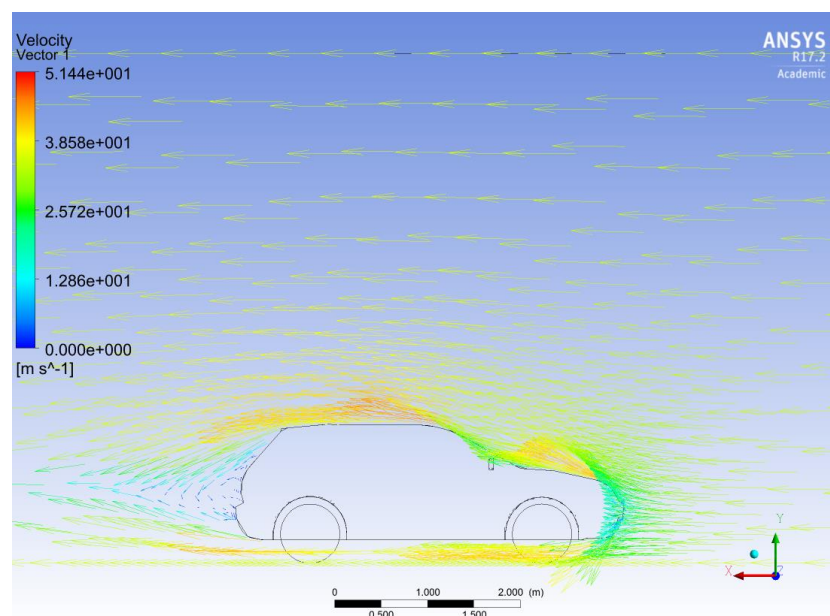


Figura 9.3. Distribución vectores velocidad.

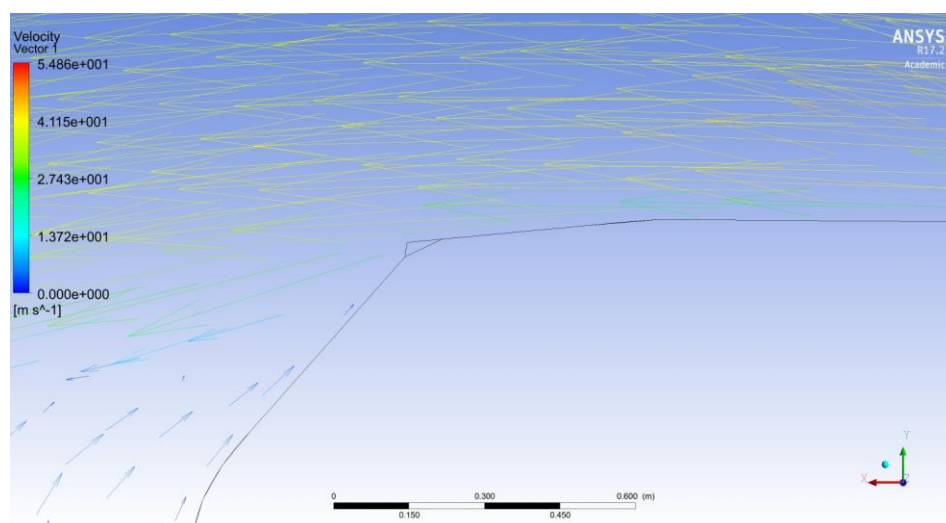


Figura 9.4. Distribución vector velocidad parte trasera del vehículo.

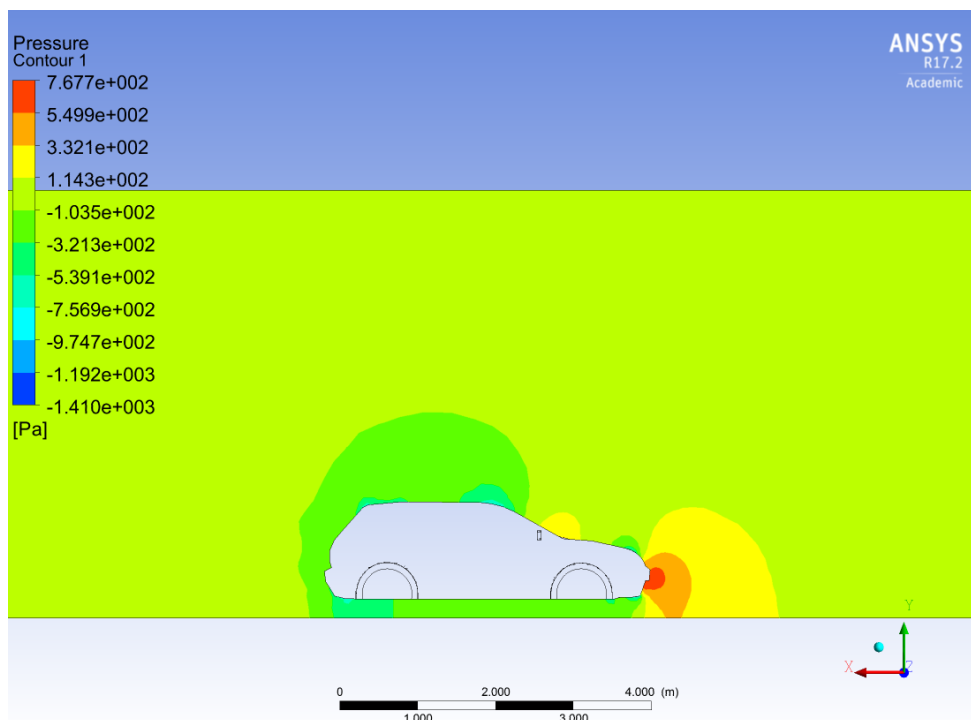


Figura 9.5. Contorno de presiones.

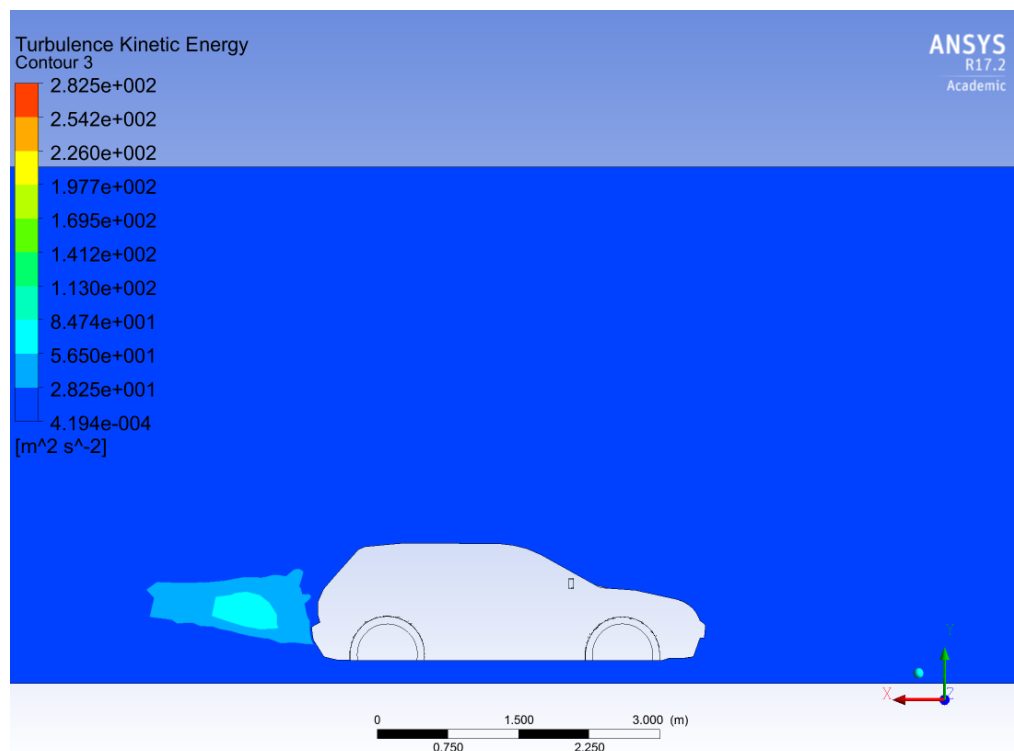


Figura 9.6. Distribución de la turbulencia.

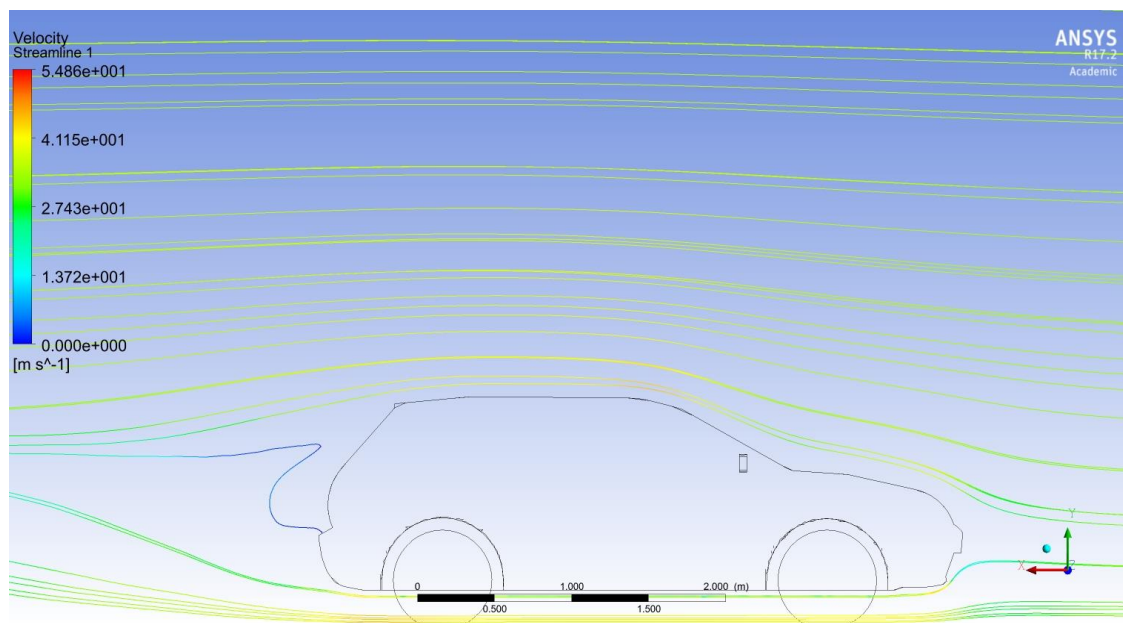


Figura 9.7. Líneas de corriente.

9.2.2. Con VG

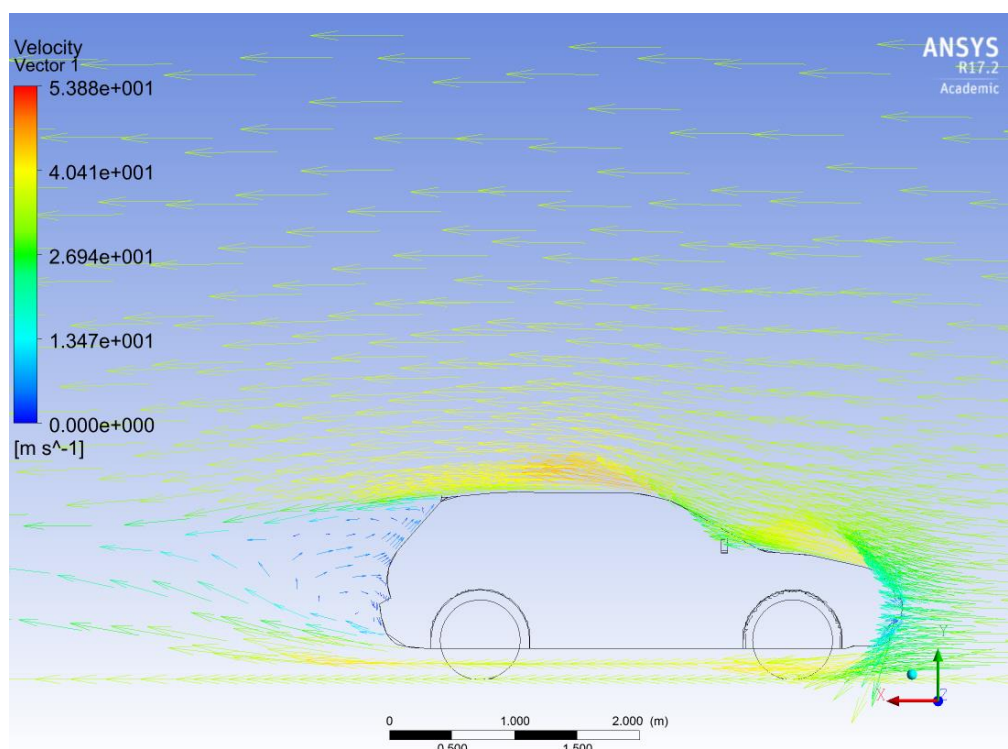


Figura 9.8. Distribución vectores velocidad.

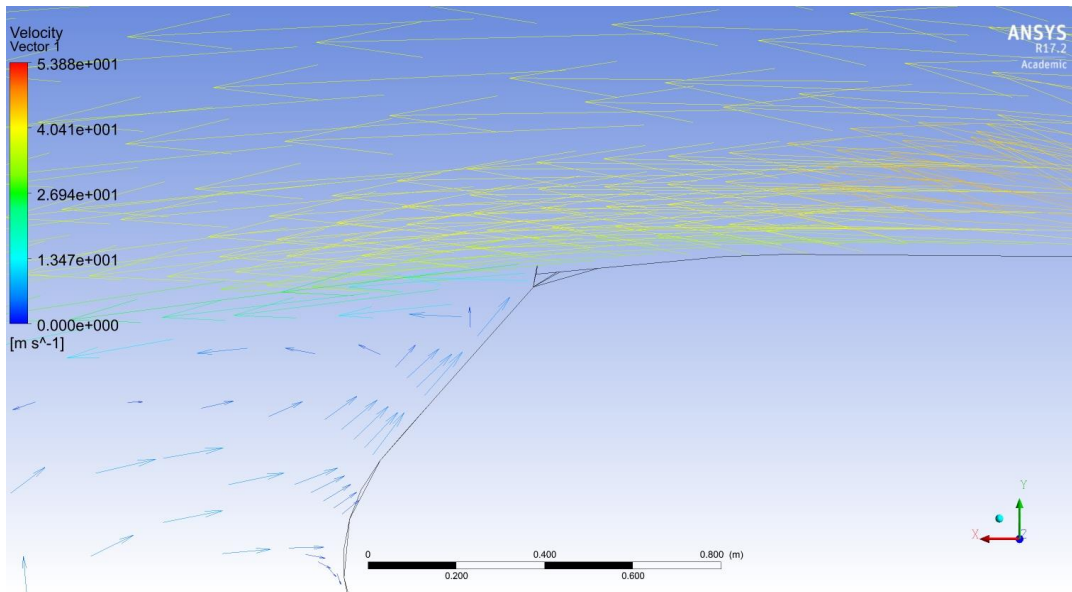


Figura 9.9. Distribución vectores velocidad detallado.

Si se comparan las figuras 9.3 y 9.4 con las figuras 9.8 y 9.9, se puede observar que mientras no haya VG el vector velocidad tiende a separarse del coche, pero al añadir los VG se crean vórtices (los vectores velocidad hacen una especie de remolino) justo al terminar la parte superior del vehículo, hecho que permite que haya un desprendimiento de capa límite más tardío.

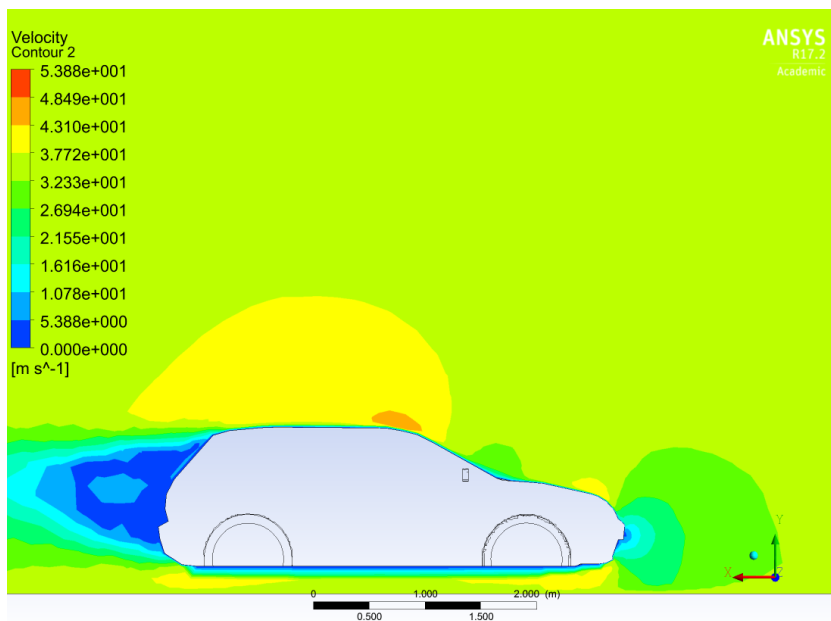


Figura 9.10. Contorno de velocidades.

En la figura 9.10 se puede apreciar la mayor generación de estela provocado por la

implantación de los VG.

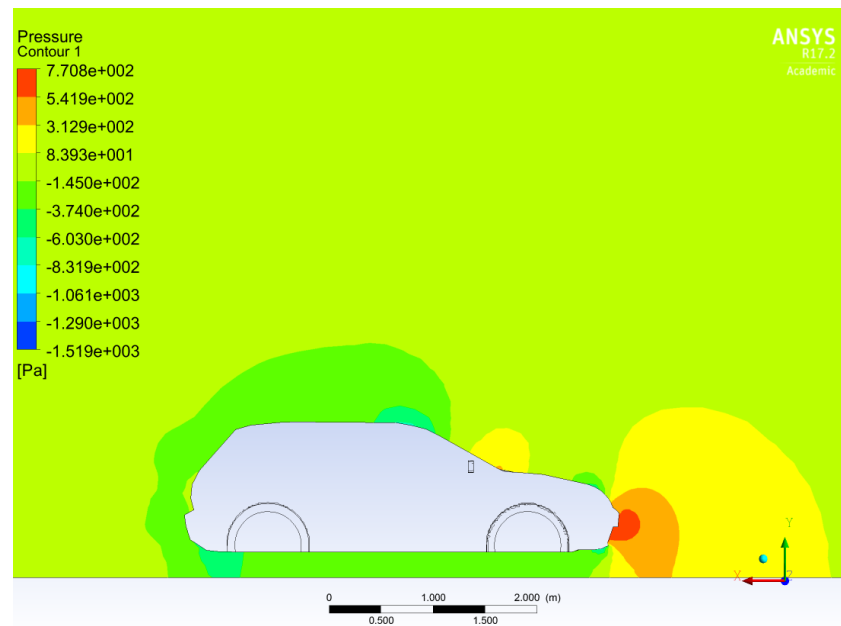


Figura 9.11. Distribución de presiones.

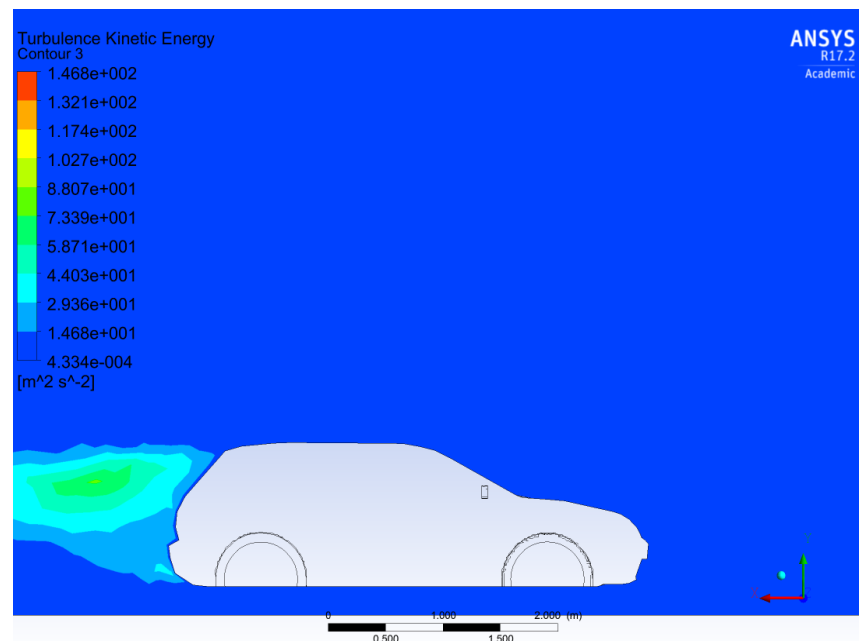


Figura 9.12. Distribución de la turbulencia.

En la figura 9.12, si se compara con la figura 9.6, se puede observar que la turbulencia ha aumentado al añadir los VG, por lo que se ha conseguido generar lo que se quería al

añadir los VG.

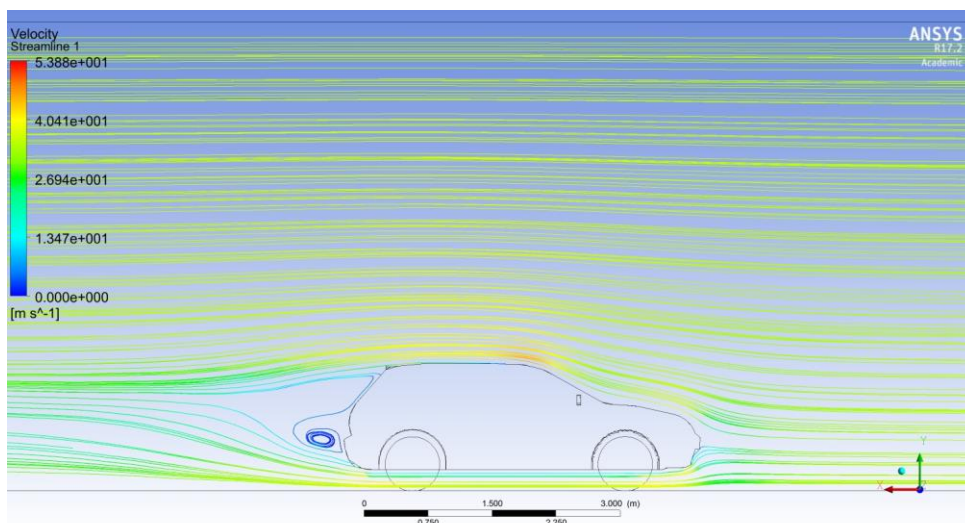


Figura 9.13. Líneas de corriente.

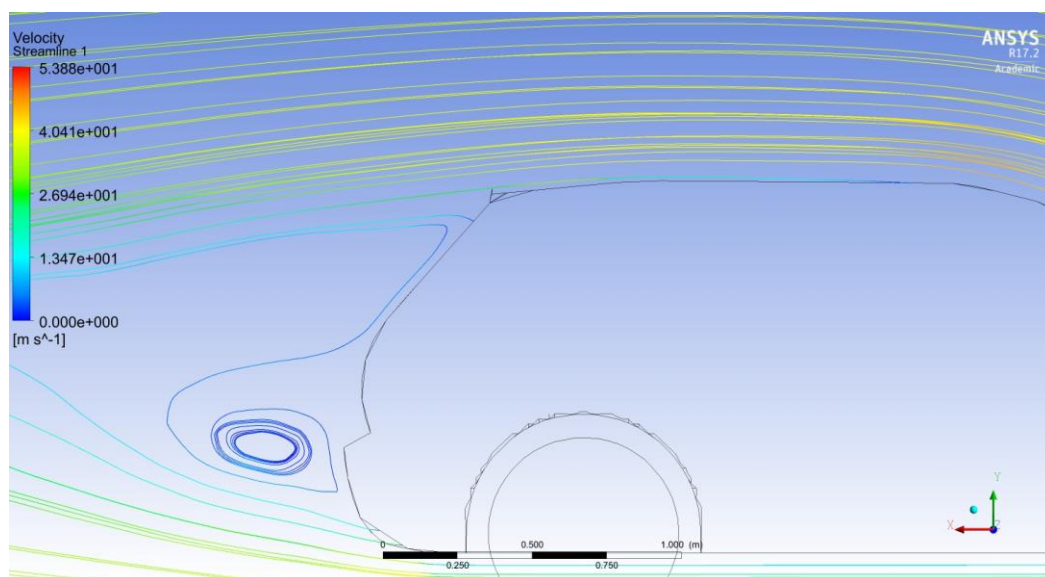


Figura 9.14. Líneas de corriente en la zona de los VG.

En las figuras 9.13 y 9.14 es posible apreciar como las líneas de corriente del fluido permanecen más cerca del coche. En la zona de los VG, las líneas de corriente tienden más hacia el vehículo que las mismas líneas sin los VG, provocando así una separación menor hacia el vehículo y una separación de la capa límite más tardía.

10. ESTUDIO ECONÓMICO

10.1. Costes del desarrollo del proyecto

Para calcular los costes del desarrollo del proyecto se han tenido en cuenta las horas dedicadas y los recursos utilizados. Estos costes reflejan el trabajo realizado en el desarrollo y el material que ha sido necesario para llevarlo a cabo.

Dentro de los elementos informáticos y de los programas utilizados, el coste no será su totalidad, ya que no es, para uso exclusivo de este proyecto, sino que los costes se amortizarán dentro de su vida útil.

Teniendo en cuenta que la duración del proyecto ha sido aproximadamente de unos tres meses, se calculará la amortización del ordenador y de las licencias partiendo de este dato. Se considerará que la vida útil del ordenador es de cinco años, mientras que todas las licencias son anuales. Si el precio total del ordenador ha sido de 800€, el precio de la licencia de estudiante de Solidworks® es de 135€, la licencia de Ansys® de 6500€ y la licencia para Office es de 279€; la amortización de cada elemento ha sido calculada directamente en las siguientes tablas.

Diseño de geometría	Medición [horas]	Precio [€/hora]	Importe [€]
Simplificación geometría turismo	5	15	75
Diseño VG	2	15	30
Diseños alternativos	5	15	75
Licencia Solidworks® versión estudiante		33,75	33,75
Total			213,75

Tabla 10.1. Costes relacionados con la geometría.

Simulación elementos finitos	Medición [horas]	Precio [€/hora]	Importe [€]
Estudio de malla	75	15	1125
Simulación y análisis	100	15	1500
Licencia Ansys®		1625	1625
Total			4250

Tabla 10.2. Costes debido a la simulación.

Otros	Medición [horas]	Precio [€/hora]	Importe [€]
Licencia Office Hogar y Empresas		69,75	69,75
Ordenador		200	200
Redacción memoria	100	15	1500
Total			1769,75

Tabla 10.3. Costes varios.

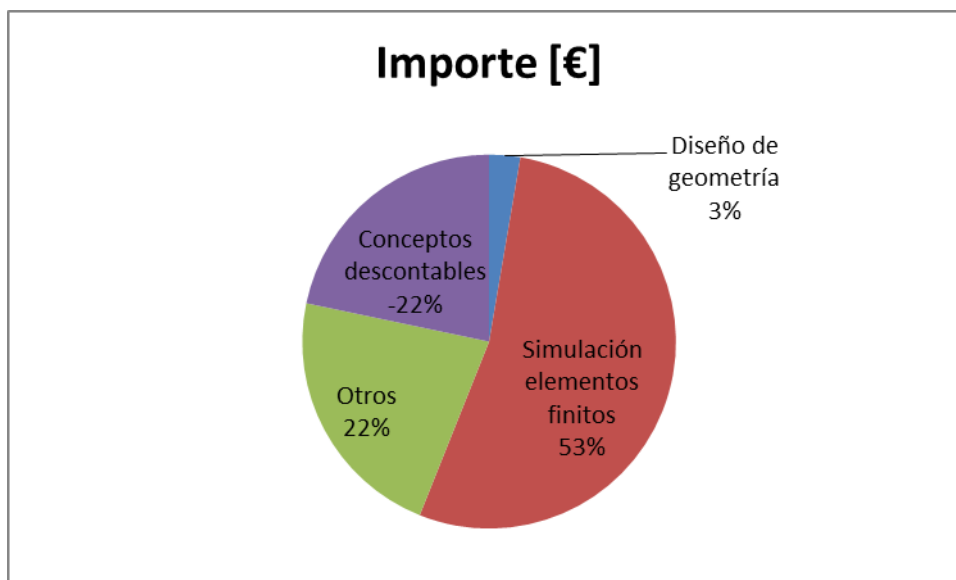
La siguiente tabla muestra los productos que no han tenido que ser adquiridos para la realización del proyecto ya que han sido facilitados por el centro educativo.

Conceptos descontables	Cantidad	Precio [€]	Importe [€]
Licencia SolidWorks® versión estudiante	1	33,75	33,75
Licencia Ansys®	1	1625	1625
Licencia Office	1	69,75	69,75

Hogar y Empresas			
Total			1728,5

Tabla 10.4. Costes descontables.

Actividad	Importe [€]
Diseño de geometría	213,75
Simulación elementos finitos	4250
Otros	1769,75
Conceptos descontables	-1728,5
Total	4505

Tabla 10.5. Coste total.**Figura 10.1.** Distribución coste total del proyecto.

10.2. Diagrama de Gantt

Actividad	01-nov	07-nov	09-nov	26-nov	28-nov	11-dic	12-dic	20-dic	15-ene
Diseño geometría inicial									
Diseño VG									
Estudio mallado									
Simulación									
Análisis									
Redacción memoria									

Tabla 10.6. Diagrama de Gantt del proyecto.

En la tabla anterior se puede apreciar la planificación que se ha seguido para realizar el proyecto, la planificación que se ha seguido no es la única que se puede seguir para realizarlo correctamente. Es cierto que la actividad de redacción de memoria para poder concluirlo es necesario haber realizado todas las actividades anteriores, no obstante se puede iniciar en cualquier momento.

Por otro lado, se podría haber procedido simplificando la geometría del turismo, hacer un estudio de la malla, simular y analizar los resultados del turismo sin VG; y más adelante diseñar los VG y hacer de nuevo la secuencia comentada.

Se decidió seguir la planificación mostrada por diferenciar más claramente el proyecto en dos bloques, la parte de diseño y la parte de simulación.

11. EVALUACIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

11.1. Análisis

El proyecto analizado tendrá un efecto pequeño sobre el medioambiente al tratarse de un proyecto que sugiere una modificación en la aerodinámica del vehículo, es decir, no se provocará un aumento excesivo del impacto medioambiental provocado por los automóviles sin VG.

Sin embargo, en todo proyecto es vital tener en cuenta el impacto ambiental, por mínimo que sea. Por ello, este proyecto se ha desarrollado con una gestión ambiental integrada, teniendo en cuenta en todas las etapas del proyecto si estas pueden afectar al medioambiente.

A continuación se realizará un análisis del impacto ambiental que puede tener el proyecto sobre los diversos factores ambientales. Teniendo en cuenta la poca complejidad del estudio, solo será necesario realizar un Informe Medioambiental principalmente para asegurarse de que se ha tenido en cuenta toda la posible incidencia ambiental del proyecto.

El cálculo del impacto ambiental se realiza de la siguiente manera:

Impacto ambiental = Estado previo del proyecto – Estado final tras la acción humana

11.2. Estado previo del proyecto

La contaminación del aire es producida sobre todo por los medios que emiten gases de escape en el interior de las ciudades y depende de la energía de tracción consumida. El automóvil es el medio que más energía de tracción consume. Se sitúa así como principal foco emisor y principal responsable de la contaminación del aire en las ciudades. Los automóviles son responsables del 80% de emisiones de NO₂ debidas al tráfico y del 60% de emisiones de partículas.

La exposición a la contaminación atmosférica a los niveles actuales de contaminación provoca serios efectos sobre la salud de las personas: irritación de ojos, superficies mucosas y pulmones, incrementos en la mortalidad total, mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, pérdida de funcionamiento pulmonar y riesgo de incidencia del cáncer de pulmón.

Un elemento que siempre vamos a necesitar para poder desplazarnos es la energía.

Recurso de la naturaleza, que como sabemos, puede ser de muy diversos tipos, desde la que tenemos nosotros mismos y nos hace mover nuestro cuerpo, hasta la electricidad que hace funcionar los ordenadores.

Hoy en día disponemos de varios tipos de combustible, los más frecuentes son el gasoil, para los motores Diesel, y la gasolina sin plomo para todos los demás, con la excepción de los vehículos eléctricos, cada día más presentes en nuestra sociedad. Es un gran avance en la lucha contra la contaminación, si tenemos en cuenta que en este país prácticamente por cada dos habitantes hay un vehículo matriculado.

De estos dos tipos de combustible, el menos contaminante es el gasoil, carburante que contiene mucho menos azufre en su composición que la gasolina.

Desde la crisis del petróleo ocurrida en el año 1973, los fabricantes de la industria del automóvil han sacado al mercado vehículos cada vez más compactos y económicos, seguros y ecológicos. Vehículos que consumen menos y con los que se ahorra más. De hecho, el gran empuje que han tenido en el mercado los vehículos con motores diesel, se deben tanto a que es un tipo de motor adaptable a cualquier vehículo como al hecho de que su combustible, el gasoil, es más barato y contamina menos. Aunque en la actualidad la tendencia está cambiando y se están buscando alternativas todavía menos contaminantes como el gas, el bioetanol, la energía solar, etc.

Por todo ello, los conductores deben ahorrar energía mediante un uso eficiente del vehículo y un adecuado mantenimiento del mismo.

La contaminación ambiental o atmosférica que producen los vehículos de motor está originada por el monóxido de carbono, el gas contaminante que más abunda en la atmósfera de nuestras ciudades. El problema de este gas es que se mezcla con la hemoglobina que tenemos en la sangre y esto dificulta nuestra respiración, disminuyendo la capacidad de oxigenación que tienen nuestras células. De hecho, si inhalamos una cantidad importante de monóxido de carbono, podemos sufrir de vértigos, temblores y fuertes dolores de cabeza, y en organismos poco resistentes, esto incluso puede causar la muerte. Y por otra parte, los gases de escape de los vehículos también contienen óxidos de nitrógeno que son asimismo contaminantes.

Por todo ello, no debemos desdeñar nada la capacidad de contaminación que tienen los vehículos a motor, mucho más si tenemos en cuenta que contamos con un parque tan inmenso que hay prácticamente un vehículo por cada dos habitantes sólo en este país. Contaminación que además se ve incrementada porque aún muchos de nuestros vehículos tienen más de diez años, vehículos que por su antigüedad consumen más energía y producen mayor contaminación.

Otros productos relacionados con el vehículo y que son también altamente contaminantes son: el aceite, el anticongelante, los líquidos de freno y de embrague, etc. Estos productos al caer a la calzada son arrastrados por la lluvia y contaminan las aguas. Los talleres mecánicos y los particulares tienen la obligación de llevar estos productos a centros especializados en los que los reciclan y eliminan de una forma segura.

Los propios vehículos o algunas de sus partes, como por ejemplo los neumáticos, son una vía de contaminación cuando son abandonados en la vía pública, por lo que es obligatorio llevar los vehículos a desguace autorizados.

11.3.Estado final tras la acción humana

Como se ha comentado en el primer punto del apartado, el proyecto trata de la implementación de VG en turismos. Los resultados o información derivada de la operativa se presentan directamente en el ordenador o en los sistemas electrónicos implementados y por tanto el consumo de productos consumibles y contaminantes es mínimo.

La inclusión de los VG se podría incorporar dentro de la cadena de montaje de un automóvil, por lo que su impacto en el medioambiente sería prácticamente nulo en comparación con la cadena de montaje en la que no se instala el VG.

No obstante, circular a gran velocidad es uno de los factores que más influencia tienen el consumo de carburante. Para ahorrar tres minutos en un recorrido urbano de 10 Kilómetros, se puede consumir más de un 50% de carburante, al añadir los VG se consigue presentar menos resistencia de arrastre, hecho que permite adquirir más velocidad, por lo que se consumiría más carburante y habría una contaminación mayor. A pesar de ello, el efecto tampoco sería tan grande ya que para que los VG hagan efecto hay que circular a una velocidad mínima, que en este estudio se ha considerado como 35m/s, que es una velocidad que generalmente solo se alcanza en autopista, lugar donde la contaminación del automóvil es mínima.

Por otro lado, si se enfoca la implementación de los VG como mejora de la eficiencia del turismo tendría un impacto medioambiental positivo ya que el turismo con VG necesitaría consumir menos para alcanzar una velocidad en concreto que uno que no llevara los VG.

11.4.Impacto medioambiental

El impacto medioambiental de este proyecto sería en definitiva en función del uso del consumidor del producto ya que como se ha comentado implementar los VG en el turismo

no provocaría un efecto a tener en cuenta. Si el usuario utilizara los VG para poder alcanzar mayores velocidades que anteriormente no podía alcanzar, esto conllevaría a un consumo de combustible mayor y por lo tanto a una contaminación mayor. Pero si el consumidor escogiera usar los VG para seguir conduciendo a la misma velocidad, al haber mejorado el rendimiento del vehículo, el consumo, y por consiguiente la contaminación sería menor.

Conclusiones

Era sabido que al implementar los VG en la posición adecuada se conseguiría reducir la fuerza de arrastre, pero la pregunta era, si al implementarlos en turismos que no son capaces de alcanzar velocidad tan elevadas se conseguiría un efecto significativo, mayor velocidad mayor coeficiente de arrastre por lo que habría más margen de mejora.

No obstante se ha podido comprobar que aplicando una altura determinada a los VG, en este caso 20mm, y colocándolos con una orientación determinada en referencia al flujo que en este caso se ha considerado paralelo al eje de simetría del turismo, es posible reducir considerablemente el coeficiente de fricción y mejorar el coeficiente de sustentación. La orientación ideal en este caso es aquella que los VG se orientan 10° respecto al eje, de forma opuesta entre sí y esta orientación es descendiente a medida que nos acercamos a los extremos del coche. Al orientar los VG con un pequeño ángulo (10°) se ha conseguido mejorar el CD en prácticamente todos los casos, por lo que se podría afirmar que una pequeña inclinación respecto el flujo, permite mejorar el CD.

Por otro lado el tipo de VG escogido para el estudio tiene un diseño bastante discreto, afectando así lo más mínimo la estética general del automóvil.

Por todos estos motivos se considera que la implementación de VG en turismos está justificada.

Si se tienen en cuenta los resultados obtenidos y las dificultades presentadas durante la realización de este proyecto, se han pensado posibles mejoras que serían recomendaciones muy a tener en cuenta si se decidiera retomar o volver a realizar un proyecto de estas características.

Sería altamente recomendable disponer de algún tipo de prueba para poder comparar los resultados obtenidos mediante simulación; como se ha comentado se podrían realizar las pruebas con un modelo exacto o en un túnel de viento a escala; con la comparación de los resultados se podría determinar si el análisis de las simulaciones es lo suficientemente bueno.

También se ha considerado interesante comentar que si se trabajara con la versión completa del programa de elementos finitos, se podría conseguir un mallado de mayor calidad, esto provocaría un mayor número de celdas, pero se encontraría una solución más cercana a la de la realidad.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] ANSYS, INC. *Introductory FLUENT Notes FLUENTv6.3*. Diciembre 2006
[\[http://www.southampton.ac.uk/~nwb/lectures/GoodPracticeCFD/Articles/Turbulence_Notes_Fluent-v6.3.06.pdf\]](http://www.southampton.ac.uk/~nwb/lectures/GoodPracticeCFD/Articles/Turbulence_Notes_Fluent-v6.3.06.pdf)
- [2] Lanfrit, Marco. *Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT*. Febrero 2005.
[\[http://www.southampton.ac.uk/~nwb/lectures/GoodPracticeCFD/Articles/Ext_Aero_Best_Practice_Ver1_2.pdf\]](http://www.southampton.ac.uk/~nwb/lectures/GoodPracticeCFD/Articles/Ext_Aero_Best_Practice_Ver1_2.pdf)
- [3] OZEN ENGINEERING, INC. *Meshing Workshop*. Noviembre 2014.
[\[https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2014/11/MESHING_WORKSHOP_2014.pdf\]](https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2014/11/MESHING_WORKSHOP_2014.pdf)
- [4] http://solidworks.cad.de/lib_fahr01.htm

Bibliografía complementaria

- [1] Akshay Parab, Ammar Sakarwala, Bhushan Paste, Vaibhav Patil, Amol Mangrulkar, *Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent- Ansys 14.5*, November 2014.
[\[http://www.ijrmee.org/download/aerodynamic-analysis-of-a-car-model-using-1429686382.pdf\]](http://www.ijrmee.org/download/aerodynamic-analysis-of-a-car-model-using-1429686382.pdf)
- [2] Gopal, P., and Senthilkumar, T. *Aerodynamic drag reduction in a passenger vehicle using vortex generator with varying yaw angles*, 2012
[\[http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2012/jeas_0912_777.pdf\]](http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2012/jeas_0912_777.pdf)
- [3] Masaru Koike, Tsunehisa Nagayoshi, Naoki Hamamoto, *Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators*,
[\[http://bpi-us.com/papers/vortexgenerators.pdf\]](http://bpi-us.com/papers/vortexgenerators.pdf)

- [4] P.N.Selvaraju*, Dr.K.M.Parammasivam, Shankar, Dr.G.Devaradjane Anna, *Analysis of drag and lift performance in sedan car model using CFD* [<http://ichps.com/specialissues/Special%20issue%207/110%20MITNC-120%20selvaraju%20429-435.pdf>]
- [5] R. B. Sharma, Ram Bansal ,*CFD Simulation for Flow over Passenger Car Using Tail Plates for Aerodynamic Drag Reduction*
[<https://pdfs.semanticscholar.org/e930/fd632f2f9fd8c07ec37742f59ac5982dbf89.pdf>]
- [6] Sambit Majumder, Somnath Saha. *A Method of Drag Reduction of a Vehicle by Computational Investigation and Geometric Modification.*
[http://www.academia.edu/9185164/A_Method_of_Drag_Reduction_of_a_Vehicle_by_Computational_Investigation_and_Geometric_Modification]
- [7] Sagar, D., Paul, A. R., Upadhyay, R. R., and Jain, A. *Aerodynamic effects of rear spoiler and vortex generators on passenger cars*, 2010.
[http://www.ijens.org/Vol_14_I_02/145302-6868-IJMME-IJENS.pdf]

ANNEXO

A. Medidas y vistas

A.1. Medidas y vistas modelo inicial

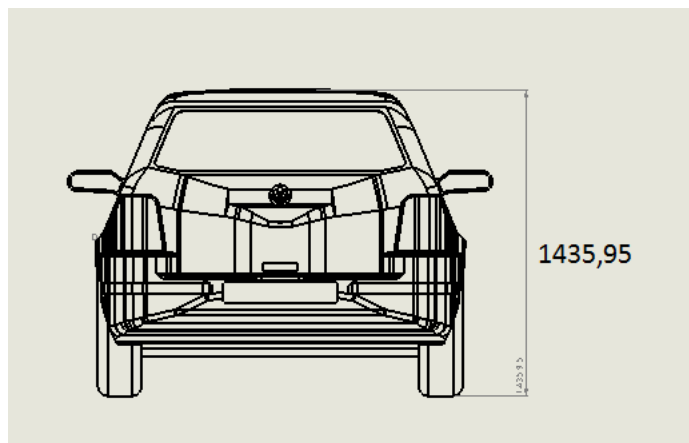


Figura A.1. Alzado modelo inicial.

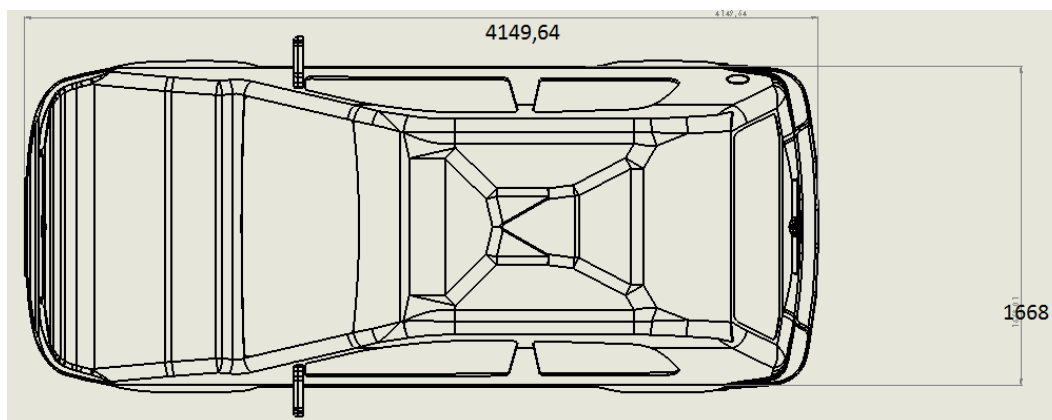


Figura A.2. Planta modelo inicial

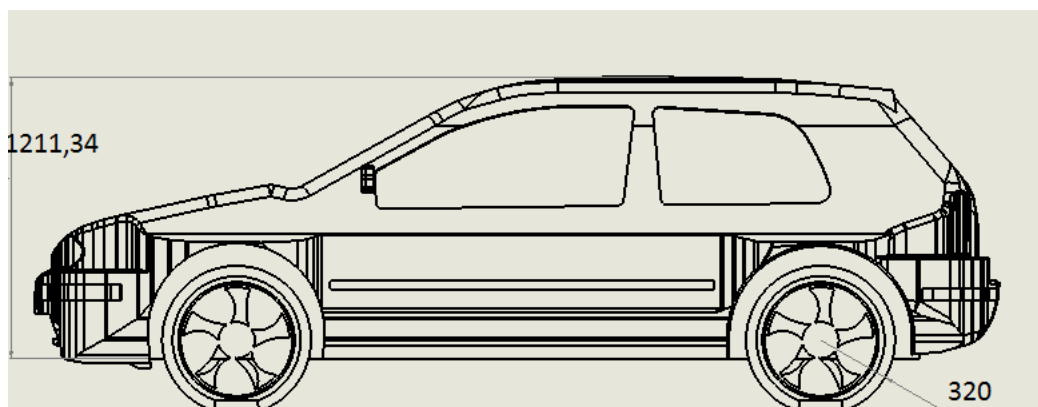


Figura A.3. Vista lateral modelo inicial.

A.2. Medidas y vistas modelo simplificado

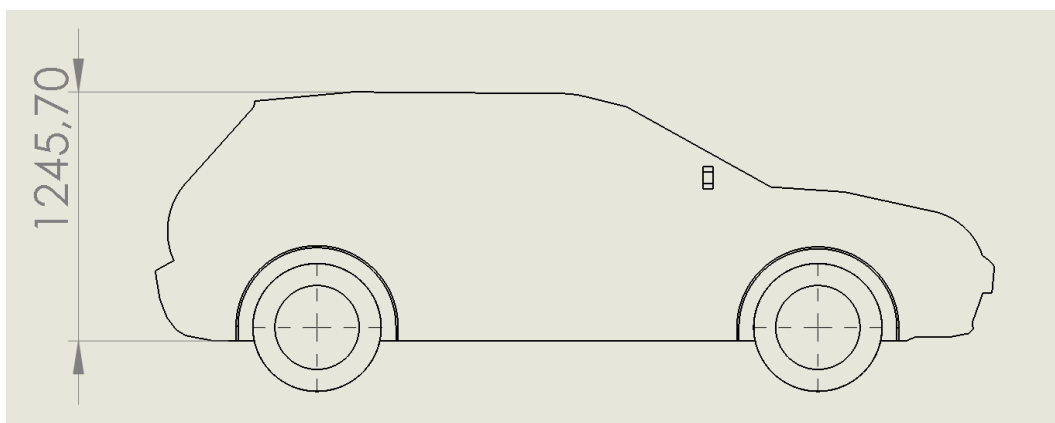


Figura A.4. Vista lateral modelo simplificado

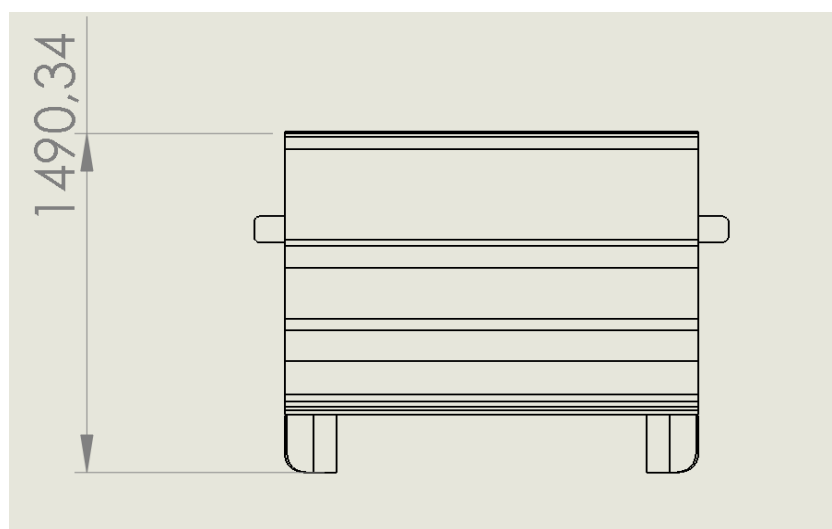


Figura A.5. Alzado modelo simplificado.

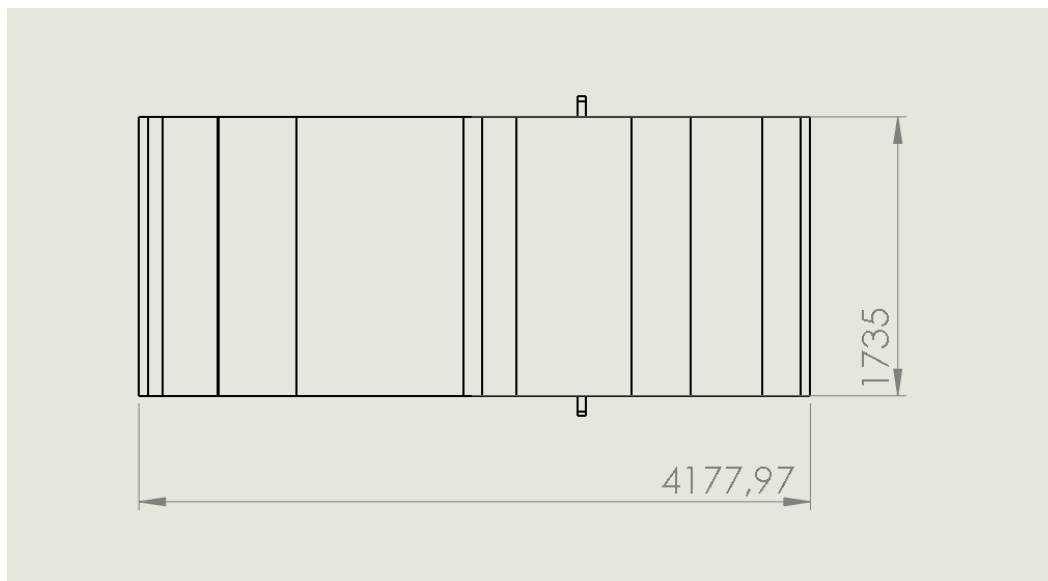


Figura A.6. Planta modelo simplificado.

B. Mallado alternativo

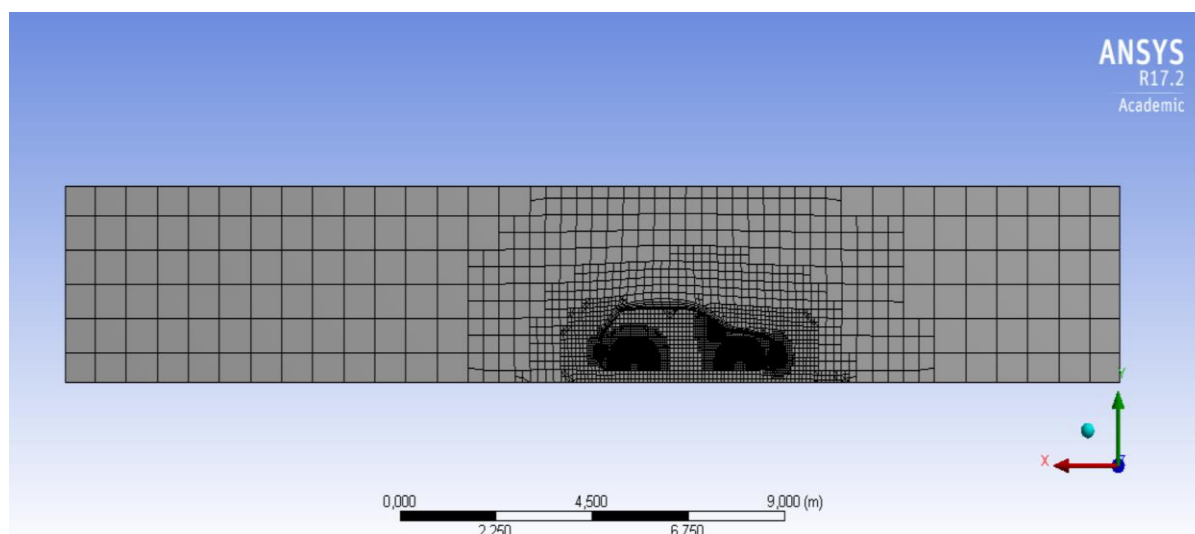


Figura B.1. Mallado CutCell

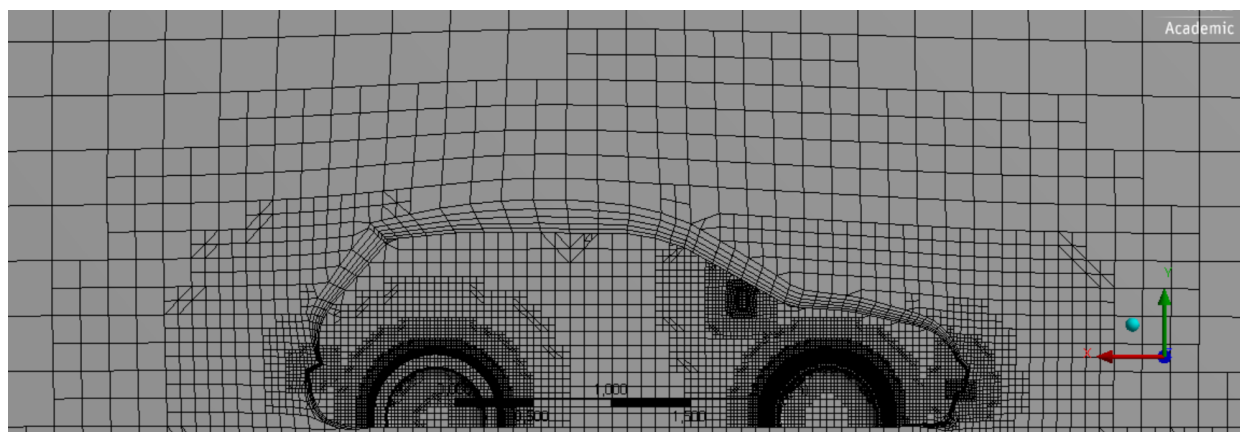


Figura B.2. Mallado CutCell detallado